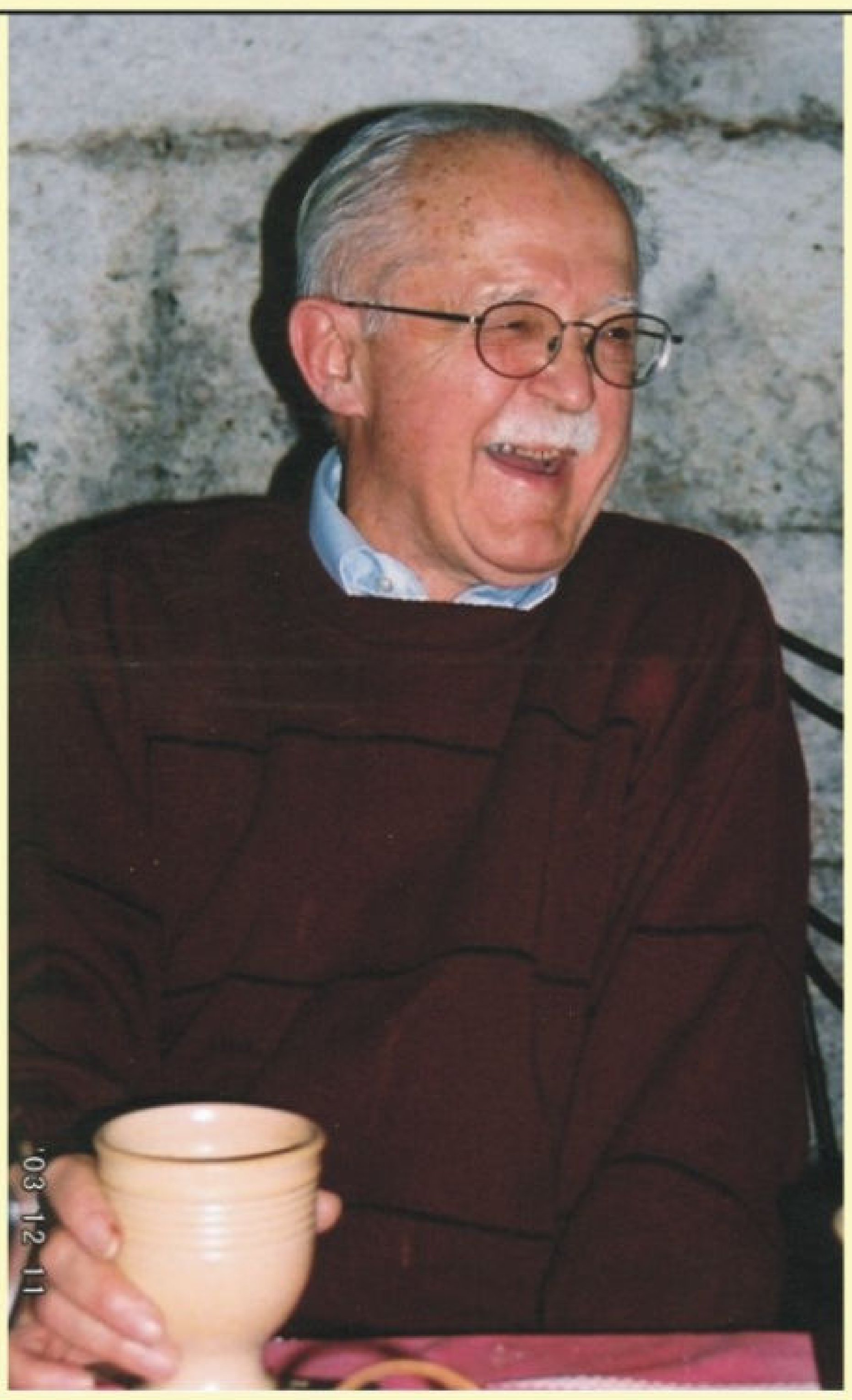
DR. UJHELYI JÁNOS és DR. POPOVICS SÁNDOR

kutatási eredményei

4. RÉSZ

Tartalomjegyzék

Dr. Ujhelyi János akadémiai doktori értekezése (1989)



Debrecen, 1925. március 28.
✞ Budapest, 2011. december 4.

Budapest, 1921. december 21.
✞ Landsdowne (USA), 2010. január 14.

és

BALÁZS GYÖRGY a műszaki tudományok doktora *opponensi véleménye* Ujhelyi János doktori értekezéséről,

GYENGŐ TIBOR a műszaki tudományok doktora *hivatalos bírálói véleménye* Ujhelyi János doktori értekezéséről,

KUNSZT GYÖRGY a műszaki tudományok doktora *opponensi véleménye* Ujhelyi János doktori értekezéséről,

UJHELYI JÁNOS *válaszai* az opponensi véleményekben megfogalmazott észrevételekre

Ujhelyi János okl. mérnöknek, a műszaki tudományok kandidátusának a doktori értekezése

A BETON STRUKTÚRÁJÁNAK ÉS NYOMÓSZILÁRDSÁGÁNAK A TERVEZÉSE

Magyar Tudományos Akadémia, Budapest, 1989. augusztus

1. BEVEZETÉS

A tartószerkezetek betonanyagának a minőségét kezdettől fogva a nyomószilárdság alapján értékelik. Ennek főleg vizsgálat-technikai magyarázata van: viszonylag egyszerű módszerekkel, viszonylag kis költséggel lehet nagy számban próbatesteket készíteni s ezeket egyszerű módon lehet megvizsgálni. A vizsgálat pontatlanságait sok próbatesttel és megismételt vizsgálatokkal lehet ellensúlyozni. A megállapított sztochasztikus összefüggésekből a gyakorlat számára kielégítő megbízhatósággal lehetett a szokványos betonok nyomószilárdságát becsülni.

Az utóbbi évtizedekben azonban a nyomószilárdsággal jellemzett teherbírás mellé számos egyéb követelmény társult, mint pl. a fagyállóság, a vízzáróság, a kopásállóság, s korrózióállóság, a korlátozott repedezettség, a csekély zsugorodás és kúszás, stb., amelyek mindegyike a ***tartósságot*** befolyásolja. Valamennyi különlegesnek tekintett tulajdonságot megkíséreltük a nyomószilárdságból becsülni; közismertek a nyomó-húzószilárdság, a nyomószilárdság-rugalmassági modulus stb. összefüggésre kidolgozott tapasztalati képletek, amelyek azonban csak nagyvonalú becslésre alkalmasak. Pedig ezekről a tulajdonságokról egyre inkább kiderül, hogy legalább olyan – ha nem nagyobb – jelentőségűek, mint a nyomószilárdság.

A beton korrózióállóságát például korábban csak akkor követeltük meg, ha a szerkezet agresszív talajba vagy talajvízbe került. Ma azonban sokkal általánosabban kell értelmezni. A környező levegőbe ugyanis – főleg városokban, ipari üzemek, főközlekedési utak környékén – egye nagyobb mennyiségben jutnak agresszív anyagok s ezek oldatok alakjában a beton korróziós károsodását okozhatják. A csupán teherbírásra tervezett beton az agresszív hatásnak nem áll ellen: tartós szerkezetet csak megfelelő szövetszerkezetű betonanyaggal lehet készíteni. A betonstruktúra jelentőségét korábban BALÁZS [1] alapvető munkájában összefoglalóan tárgyalta.

A betonszerkezetek törési tönkremenetelét az elmúlt évtizedekben világszerte ellenőrizni kezdték. GRIFFITH [2] kerámiai anyagokkal végzett vizsgálataiból már közel 70 éve megállapította, hogy a repedés az anyagokban akkor fejlődik gyorsan és okoz tönkremenetelt, ha az alakváltozási energia feloldásának az aránya legalább akkora, mint az új törési felületek kialakulásához szükséges energiáé. Ez az elmélet sokáig alkalmatlannak tűnt a beton törési mechanizmusának a tárgyalására, de KAPLAN [3] tanulmánya alapján GLÜCKLICH [4] felújította s azóta egyre többen publikálták idevágó vizsgálataik eredményét [5].

A törési mechanizmust mikrostruktúrális szinten (cementkőváz) és makroszinten (beton) egyaránt ellenőrizték, elsősorban az utóbbi vizsgálatok adtak egységes bizonyítékot a törés folyamatára. Egyértelműnek tűnik [6], hogy a repedések már e terheletlen betonban kialakulnak, mégpedig minden esetben az adalékanyag-szemcsék és a cementkőváz határfelületén, vagy a cementkővázban a szomszédos adalékanyag-szemcsék között. Ezek a repedések a betonstruktúra jellemzőitől, főleg inhomogenitásától függnek, mindenek előtt a kezdeti diszlokációktól [7] – [10]. Ebből következik, hogy annak a betonnak a törési viselkedése kedvező, amelyben a lokális hibák előfordulásának a valószínűsége csekély.

A betonstruktúra az alapanyagok, a keverési arány és a készítési technológia kölcsönhatásából alakul ki. Ha ismeretesek a kölcsönhatások, akkor a struktúra hibái korlátozhatók, a struktúra tervezhető s a tervezet struktúrájú beton valamennyi tulajdonsága nem tapasztalati összefüggésekből, hanem a struktúra alapján megbízhatóan becsülhető.

Dolgozatomban a betonstruktúra tervezésére, illetve a beton nyomószilárdságának erre alapozott becslésére az elmúlt évtizedben végzett vizsgálataim eredményeit, és az azokból levont következtetéseimet foglalom össze. Tárgyalom a keverék vízszükségletének, az adalékanyag és a cementkőváz célszerű kialakításának, a tömörség szilárdságra gyakorolt hatásának a számítási módszereit, továbbá a nyomószilárdság meghatározását.

2. ALKALMAZOTT JELÖLÉSEK

Tömeg adatok:

m_c, m_w, m_a, m_{ad} = betömörített friss beton tényleges cement-, víz-, adalékanyag- és adalékszer tartalma, kg/m^3

m_{cp}, m_{wp} = a betömörített friss cementpép tényleges cement – és víztartalma, kg/m^3

m'_c, m'_w, m'_a, m'_{ad}, m'_{cp}, m'_{wp} = a hiánytalanul tömörített betonra átszámított tömeg-adatok (az előző sorrendben), kg/m^3

m_{ai} = az adalékanyag egyes frakcióinak a tömege, kg/m^3

m_h = a 0-4 mm-es homok tömege, kg/m^3

m_{hf}, m_{hk}, m_{hd} = a finom homok (általában 0-0,5 mm, esetenként 0-0,125 mm), a közepes méretű homok (0,5-2 mm, esetenként 0,125-2 mm) és a durva homok (2-4 mm) tömege, k/m^3

Térfogat adatok:

V_c, V_w, V_a, V_{ad} = a cement, a víz, az adalékanyag és az adalékszer tömör térfogata a betömörített friss betonban, liter/m^3. Közelítő számításuk:

átlagos hazai cementekre: $V_c = \dfrac{m_c}{3{,}1}$ liter/m^3 (1)

homokos kavicsra: $V_a = \dfrac{m_a}{2{,}64}$ liter/m^3 (2)

vízre: $V_w = m_m$ liter/m^3 (3)

V_p = a cementpép tényleges térfogata a betömörített friss betonban:

$V_p = V_c + V_w$ liter/m^3 (4)

V_{po} = az adalékanyag pépigénye adott konzisztencia mellett, liter/m^3

V_{ao} = adott konzisztencia mellett bedolgozható legnagyobb adalékanyag térfogat:

$V_{ao} = 1000 - V_{po}$ liter/m^3 (5)

V_l = a betömörített friss beton össze levegőtartalma: $V_l = 1000 - (V_p + V_a)$ liter/m^3 (6)

V'_c, V'_w, V'_a, V'_{ad}, V'_p = a hiánytalanul tömörített friss betonban a cement, a víz, az adalékanyag, az adalékszer és a cementpép tömör érfogata, liter/m^3

$\Delta V'_p$ = a tökéletesen tömör beton péptartalmának és a felhasznált adalékanyag pépigényének a különbsége: $\Delta V'_p = V'_p - V'_{po}$ (7)

ha $\Delta V'_p < 0$, akkor a beton telítetlen, mert $V'_p < V_{po}$

ha $\Delta V'_p = 0$, akkor a beton telített, mert $V'_p = V_{po}$

ha $\Delta V'_p > 0$, akkor a beton túltelített, mert $V'_p > V_{po}$

Cement-jellemzők:

R_c = a cement MSZ 523 szerint vizsgált szabványos kötőereje, MPa

w_c = adott konzisztenciájú cementpép vízigénye, tömegrész

R_p = a cementpépből készített próbatest tényleges nyomószilárdsága, MPa

R'_{po} = a cementpépből készített próbatest nyomószilárdsága $V_l = 0$ mellett, MPa

x_p = a cementpép víz-cement tényezője

ρ_c = a cement sűrűsége, g/cm^3 (a hazai cementekre átlagosan 3,1 g/cm^3 vehető fel)

S = a cement Blaine-féle fajlagos felülete, m^2/kg

Adalékanyag-jellemzők:

m = a finomsági modulus (ISO-A szitasorozaton vizsgálva)

U = egyenlőtlenségi együttható

D = a legnagyobb szemnagyság, mm

d_i = közbenső szemcsék mérete, mm

a_i = szitán áthullott, adott méretű szemcsék mennyisége, tömeg %

w_a =az adalékanyag vízigénye adott konzisztenciához, tömegrész

ρ_a = az adalékanyag sűrűsége, g/cm^3 (homokos kavicsra átlagosan 2,64 g/cm^3)

Beton-jellemzők:

x = víz-cement tényező

$$x = \frac{m_w}{m_c} \qquad (10)$$

k_t = a konzisztencia mérőszáma terüléssel, cm

k_r = a konzisztencia mérőszáma roskadással, cm

k_{CP} = a tömörödés mérőszáma RILEM-GLANVILLE készülékkel mérve

k_s = víztartó képesség (konzisztencia mérőszáma vibrálási időigénnyel mérve), s

γ_f = a bedolgozott friss beton testsűrűsége, kg/m^3

γ_t = a beton testsűrűsége töréskor, kg/m^3

R = a beton mért nyomószilárdsága (tényleges nyomószilárdság adott V_l mellett), MPa

R_o = a beton nyomószilárdsága $V_{lb} = 0$ mellett, MPa

R_o' = a beton nyomószilárdsága $V_b = 0$ mellett, MPa

3. A BETONKEVERÉK VÍZSZÜKSÉGLETE

A friss betonkeverék valamennyi jellemzője, mint mozgékonysága, összetartó képessége, szállíthatósága, tömöríthetősége stb. jelentős mértékben függ a víztartalmától. A betonkeverék vízigényének, az előírt bedolgozhatósághoz (konzisztenciához) szükséges víztartalomnak a szabatos meghatározása ezért kezdettől foglalkoztatja a beton készítőit, de különösen fontossá vált, amióta a betonnal szemben támasztott követelmények bővültek és szaporodtak. A keverék víztartalma a megszilárdult beton valamennyi tulajdonságát meghatározza, ezért ezeknek a tulajdonságoknak a várható értékét csak akkor lehet megbízhatóan becsülni, ha a vízigény is megbízhatóan becsülhető.

A szemcsés halmazok belső súrlódása a szemcsefelületek nedvesítésével csökkenthető, ezért a friss betonkeverék több tulajdonsága (pl. mozgékonyság, tömöríthetőség) általában viszonylag nagy víztartalom mellett kedvező. A megszilárdult beton tulajdonságait ugyanakkor a pórustartalom csökkentésével lehet javítani, s mivel annál több az elpárolgó víz helyén visszamaradó pórus, minél nagyobb a víztartalom, szükséges ezért a vízadagolást mérsékelni.

A keverék megfelelő vízadagolásának szabatos tervezhetősége a megszilárdult beton várható pórustartalmának a becslését is elősegíti.

3.1. Vízigénybecslő módszerek

A vízigény becslésére – alapelveit tekintve – háromféle eljárás alakult ki.

Az **egyik módszer** a betont különböző méretű szemcsékből álló halmaznak tekinti, a különböző szemnagyságokra a vízigényt külön-külön meghatározza és a betonkeverék vízigényét a részvízigények összegéből számítja. Néhány jellegzetes eljárás a következő.

FERET [11] szerint a cement és a finomhomok (0 – 0,5 mm) vízigénye közel azonos: 23,5 és 23 tömeg %; a közepes homoké (0,5 – 2 mm): 9 tömeg %; a durva homoké (2 – 4 mm): 3 tömeg %. A kavics vízigénye elhanyagolható. Ezért a képlékeny betonkeverék szükséges vízadagolása:

$$m_w = 0{,}235 \,.\, m_c + 0{,}23 \,.\, m_{hf} + 0{,}09 \,.\, m_{hk} + 0{,}03 \,.\, m_{hd} \qquad kg/m^3 \qquad (11)$$

BOLOMEY [12] a következő összefüggést ajánlotta:

$$m_w = 0{,}27 \,.\, m_c + \sum_{i=1}^{n} \frac{N.m_{ai}}{\sqrt{d_1.d_2}} \qquad kg/m^3 \qquad (12)$$

ahol N = a szemalaktól függő állandó, mégpedig a gömbölyű szemű adalékanyagra $N = 0{,}08 - 0{,}11$ és a zúzott szeműre $N = 0{,}095 - 0{,}13$; továbbá d_1 és d_2 = az adott frakció legkisebb és legnagyobb szemnagysága, mm (a legkisebb frakció határai: 0,2 – 1 mm).

LEVIANT [13] az adott frakció átlagos szemnagyságától függően javasolja a vízigény meghatározását. Számításaim szerint LEVIANT adatait az alábbi összefüggés jól közelíti:

$$m_w = \sum_{i=1}^{n} m_{ai} \times \frac{0{,}072}{\sqrt{d_i}} \qquad \mathrm{kg/m^3} \qquad (13)$$

Meg kell jegyezni, hogy LEVIANT szerint a cementre 0,08 mm, a legfinomabb homokfrakcióra 0,1 átlagos szemnagyság vehető fel.

Az Építéstudományi Intézetben HORVÁTH [14] a cement és a homokoskavics frakcióinak a vízigényét JOISEL [15] módszerével vizsgálta meg. HORVÁTH vizsgálati eredményei – számításaim szerint – az alábbi összefüggéshez vezetnek:

$$m_w = \sum m_{ai} \times 4{,}65 \times e^{-3{,}9 \times d_i^{0{,}1}} \qquad \mathrm{kg/m^3} \qquad (14)$$

HORVÁTH szerint a cementre 0,06 mm, a legfinomabb homokfrakcióra 0,1 mm szemnagyság vehető fel.

A vízigénybecslő módszerek **másik csoportja** a cement vízigényét tartja meghatározónak, az adalékanyag vízigényét kisebb jelentőségűnek. Néhány példa ezekre az eljárásokra a következő:

ABRAMS [16] – vizsgálati eredményi alapján – az alábbi kifejezést ajánlja:

$$m_w = 0{,}23 \times m_c + k \times m \times \left(0{,}16 - \frac{m_A}{50}\right) \qquad \mathrm{kg/m^3} \qquad (15)$$

ahol m_A = az ABRAMS-féle finomsági modulus; k = a szemcsealaktól függő állandó, mégpedig gömbölyű szemű adalékanyagra $k = 1{,}2$.

A francia Híd- és Útügyi Szövetség a jóminőségű, előírt szemmegoszlású adalékanyagból készített, vibrálható betonok szükséges vízmennyiségének a meghatározására az alábbi kifejezést ajánlja:

$$m_m = 45 + 0{,}23 \,.\, m_c \qquad kg/m^3 \qquad (16)$$

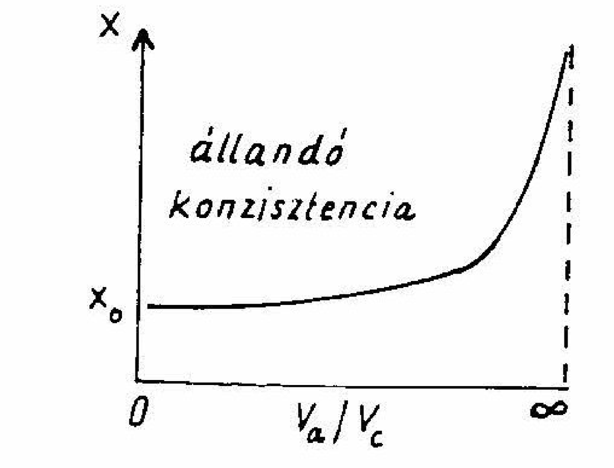
azaz a vízigény az adalékanyag állandó vízigényén (45 kg/m^3) túl a cementtartalomtól függően változik.

SUENSON [18] képlete:

$$m_w = 0{,}26 \times m_c + 0{,}02 \times m_k + \left[0{,}117 \times \left(\frac{m_h}{m_c + m_h}\right)^2\right] \times m_h \qquad \mathrm{kg/m^3} \qquad (17)$$

ahol m_k = a kavics (4-D mm) tömege, kg/m^3.

ALEXANDERSON [19] ún. keveréktervezési görbét javasol. Ezt abból a megfontolásból lehet meghatározni, hogy adott x_p víz-cement tényezőjű cementpép adott konzisztenciájú. Ha a péphez fokozatosan növekvő mennyiségű száraz adalékanyagot kevernek, akkor a konzisztencia csak növekvő víz-cement tényező mellett maradhat változatlan. Ennek a változásnak a jelleggörbéjét mutatja az 1. ábra. Ha $V_a/V_c \to \infty$, akkor $x \to \infty$, azaz a keverék vizes adalékanyaggá válik, míg ha $V_a/V_c \to 0$, akkor tiszta cementpéppé, ahol $x = x_p$.



1. ábra

A vízigénybecslő módszerek **harmadik csoportja** az adalékanyag vízigényéből indul ki és a cement vízigényét csak bizonyos cementtartalmak fölött veszi figyelembe agy csak kicsiny értékkel. Néhány példa a következő:

SCHOLZ [20] a *„k”* szemcsetényező (*Körnungsziffer*) függvényében adja meg a beton vízigényét. Mivel az MSZ 4713 szerinti *m* finomsági modulus és a *k* szemcsetényező összefüggése:

$$k = \frac{m - 1{,}4}{1{,}58} \qquad (18)$$

ezért a SCHOLZ által megadott ábra alapján – számításaim szerint – a földnedves beton vízadagolása az alábbiak szerint határozható meg:

$$m_w = 0{,}1 \,.\, (m_c - 300) + 726 \,.\, e^{-\left(\frac{m-1{,}4}{1{,}58}\right)^{0{,}38}} \quad \text{kg/m}^3 \qquad (19)$$

ahol az első tagot csak $m_c > 300\ kg/m^3$ mellett kell figyelembe venni. Kissé képlékeny konzisztenciára +10 kg/m^3, képlékenyre +20 kg/m^3 és folyós konzisztenciára +30 k/m^3 vizet kell SCHOLZ szerint adagolni.

ROTHFUCHS [21] az adalékanyag vízigényét a *„méretösszeg” (D-Summe)* függvényében állapítja meg. A *D-Summe (DS)* a 0,2; 1; 3; 7; 15; 30 és 70 mm körlyukú rostán átesett szemcsék tömegszázalékainak az összege. Ábráinak megfelelően a vízigény becslésére – számításaim szerint – az alábbi képlet alkalmas:

$$m_w = 0{,}1 \times (m_c - 300) + \left[A + \left(\frac{DS - 250}{350}\right) \times B\right] \quad \text{kg/m}^3 \qquad (20)$$

ahol *A* és *b* értékei különböző konzisztenciákra az alábbiak:

konzisztencia:	*AFN*	*FN*	*KK*	*K*	*F*	*Öm*
A :	*110*	*123*	*136*	*149*	*162*	*176*
B :	*105*	*102*	*100*	*97*	*94*	*91*

PALOTÁS [22] tervezési módszerében a földnedves betonhoz adagolandó víz mennyiségét az alábbi kifejezésből számítja:

$$m_w = 0{,}1 \times m_c + 23 \times (10 - m_A) \quad \text{kg/m}^3 \qquad (21)$$

Megjegyzendő, hogy jó közelítéssel $m_A = m - 1{,}1$ [23],

A földnedves konzisztenciától elérő bedolgozhatóságú betonokhoz szükséges víz a hígítási szorzótényező segítségével állapítható meg, ennek értékei

- kissé képlékeny konzisztenciára átlagosan: 1,15
- képlékeny konzisztenciára átlagosan : 1,25
- folyós konzisztenciára átlagosan : 1,35

POPOVICS [24] a beton cement- és víztartalmát lb/cu·yd-ban határozta meg. Képlete kg/m^3-ben kifejezve az alábbi:

$$m_w = 1{,}67 \times m_c \times [0{,}1 \times \{0{,}032 \times (2^m - 60)^2 + 6570\} / 1{,}67 \times (m_c - 100)] \times 0{,}6 \quad kg/m^3 \qquad (22)$$

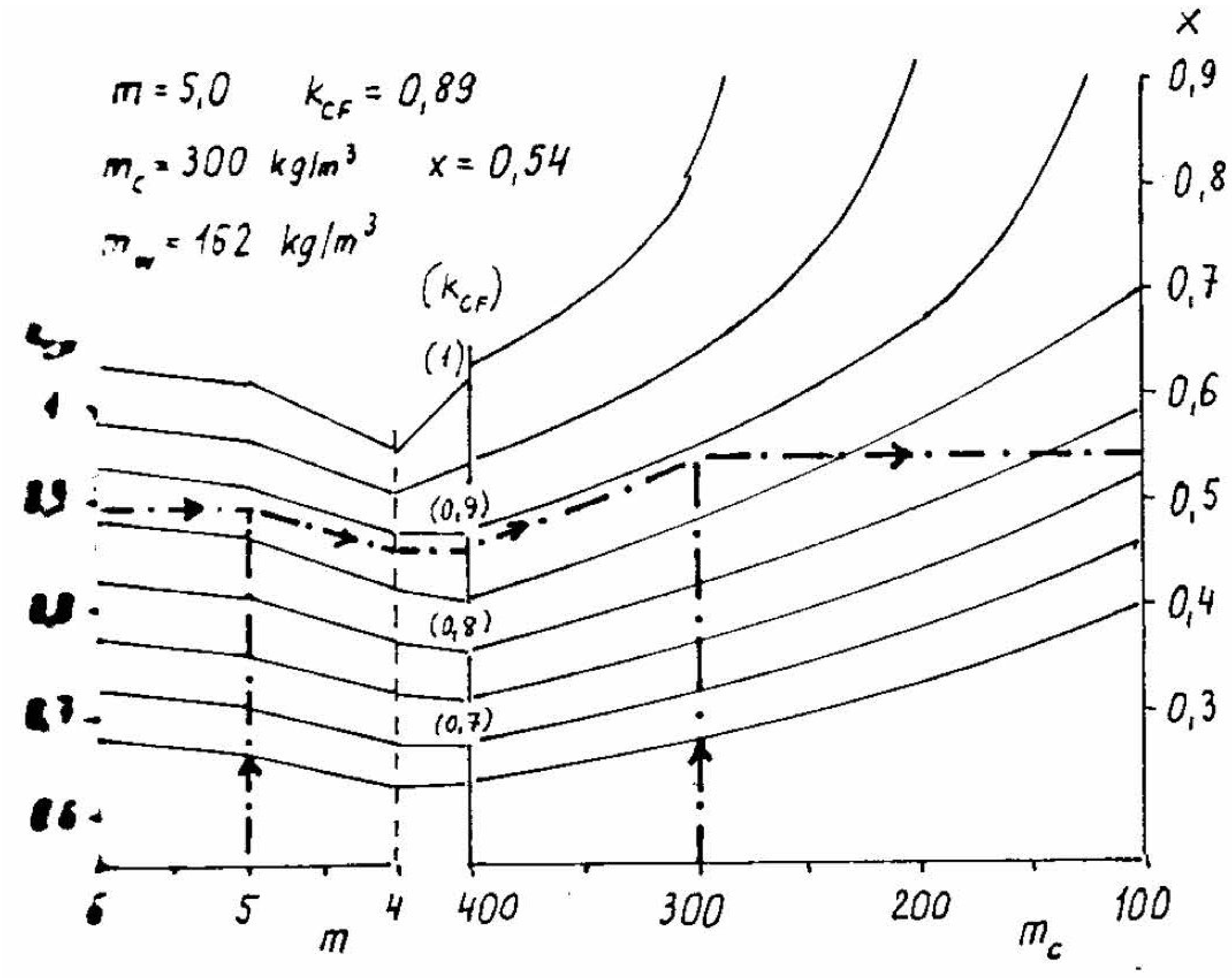
Ezzel az összefüggéssel $k_r = 25\ mm$ (*1 inch*) roskadású betonkeverék szükséges víztartalma számítható.

Vizsgálatai alapján KAUSAY [25] betontervezési nomogramot készített, amelyben a különböző konzisztenciájú keverékek vízigényét a finomsági modulus és a cementtartalom függvényében adja meg. A nomogram vázlata a 2. ábrán látható.

Az ÉTI-ben végzett vizsgálatai alapján ARMUTH [26] azt találta, hogy $m_c < 300\ kg/m^3$ cementtartalmú betonok keverővíz szükséglete független a cement-tartalomtól és értékét földnedves konzisztenciára

$$m_w = 275 - 22{,}7 \times m_c \quad \text{kg/m}^3 \qquad (23)$$

kifejezésből lehet számítani. Az egyéb konzisztenciákhoz szükséges vízadagolás PA-LOTÁS (21) összefüggéséhez tartozó hígítási tényezőkkel határozható meg.



2. ábra

SZIZOV [27] szerint a keverővíz szükséges mennyisége adott szemeloszlású adalékanyag mellett mindaddig változatlan, amíg $m_c \leq 350\ kg/m^3$. Ha a cementtartalom ennél nagyobb, akkor változatlan konzisztenciához $m_w = m_{wo} + \Delta m_w$ szükséges, ahol Δm_w a cementtöbblet függvénye. A szovjet gyakorlat egyébként BAZSENOV [28] szerint a vízadagolást az adalékanyag legnagyobb szemnagyságától függően abszolút értékben adja meg külön a *FN* betonokra (konzisztenciáját technikai viszkoziméterrel mérik) és külön a *KK-F* , roskadással ellenőrzött konzisztenciájú keverékekre.

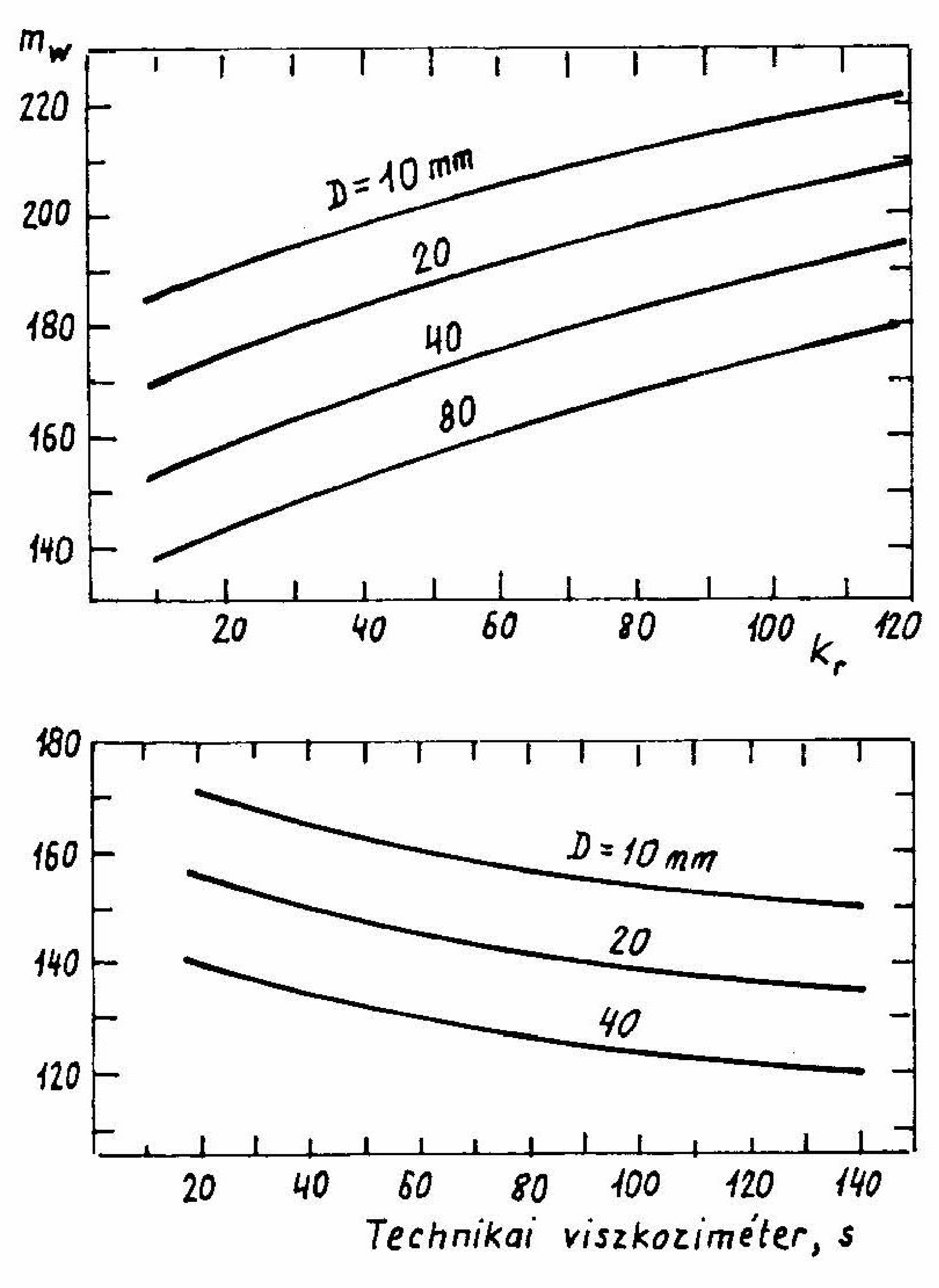
A javasolt értékek a 3. ábrán láthatók.

A különböző eljárásokkal számítható vízmennyiségeket *300 kg/m³* cementtartalmú, *képlékeny* betonokra a 4. ábrán foglaltam össze. Megjegyzem, hogy a cement és a homokos kavics tömör térfogatát az (1) és (2) összefüggésekből számítottam ki, továbbá

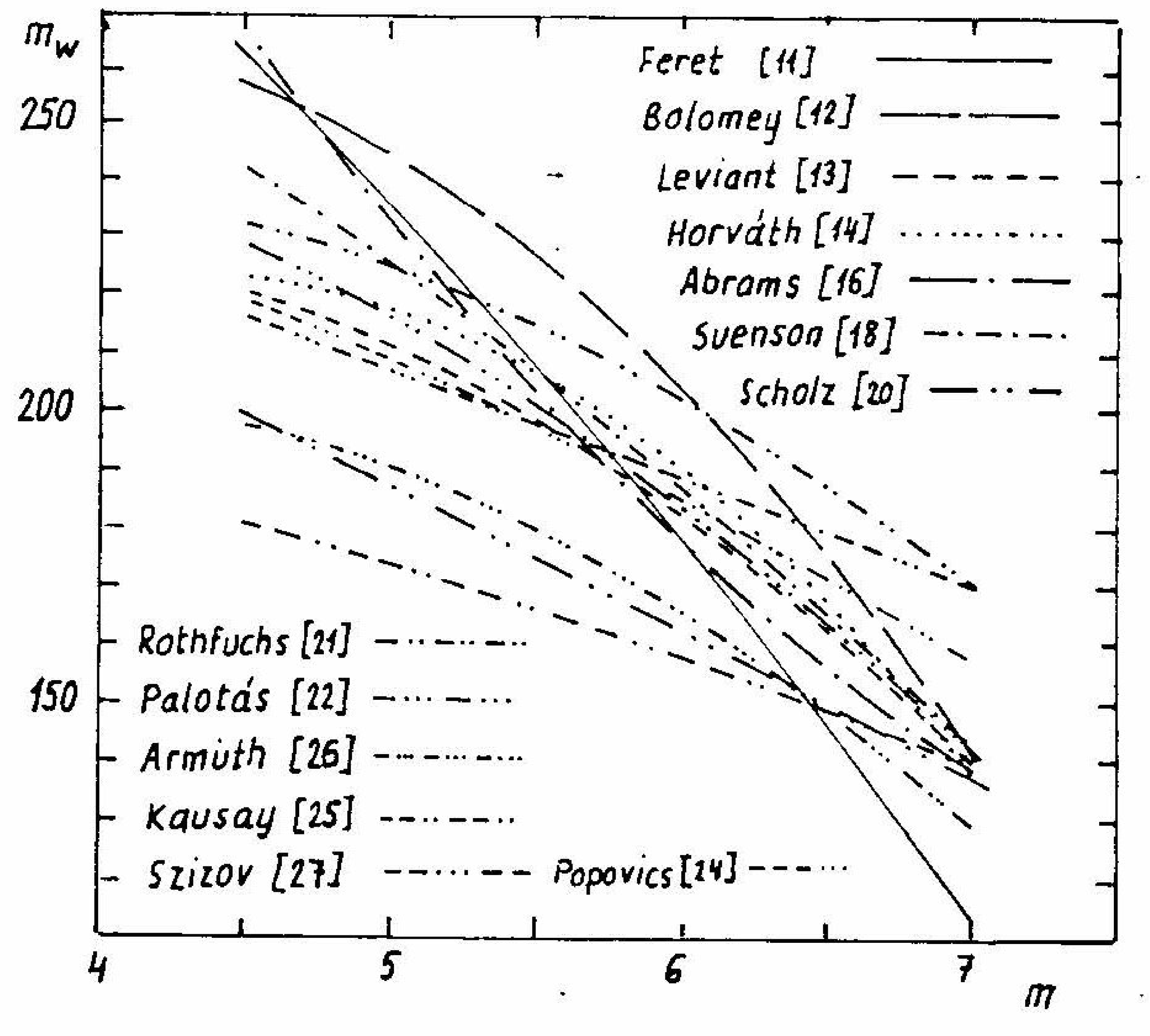
$$1000 = V_c + V_a + V_w \quad liter/m^3 \qquad (24)$$

összefüggést használtam fel.

Például $m_c = 300\ kg/m^3$ cementtartalom és $D = 16\ mm$, $m = 5{,}56$ („B" görbe) homokos kavics felvételével, amelyben 20 % 0 – 0,5 mm-es, 24 % 0,5 – 2 mm-es és 15 % 2-4 mm-es homok van, a (11) FERET-képletből:



3. ábra



4. ábra

$$m_w = 300 \times 0{,}235 + 0{,}23 \times 0{,}2 \times m_a + 0{,}09 \times 0{,}24 \times m_a + 0{,}03 \times 0{,}15 \times m_a = 70{,}5 + 0{,}0721 \times m_a \quad kg/m^3$$

számítható, ezért a (24)-ből: $1000 = (300 > 3{,}1) + (m_a : 2{,}64 + 70{,}5 + 0{,}0721 \times m_a$ *lietr/m³* , tehát

m_a = (1000- 167,3) : [(1:2,64) +0,0721] = 1847 kg/m^3

Ebből következik, hogy FERET szerint a szükséges vízadagolás:

m_w = 70,5 + 0,0721 × 1847 = 20,4 kg/m^3 .

A többi becslési módszerrel is a fentieknek megfelelően határoztam meg a szükséges vízadagolást.

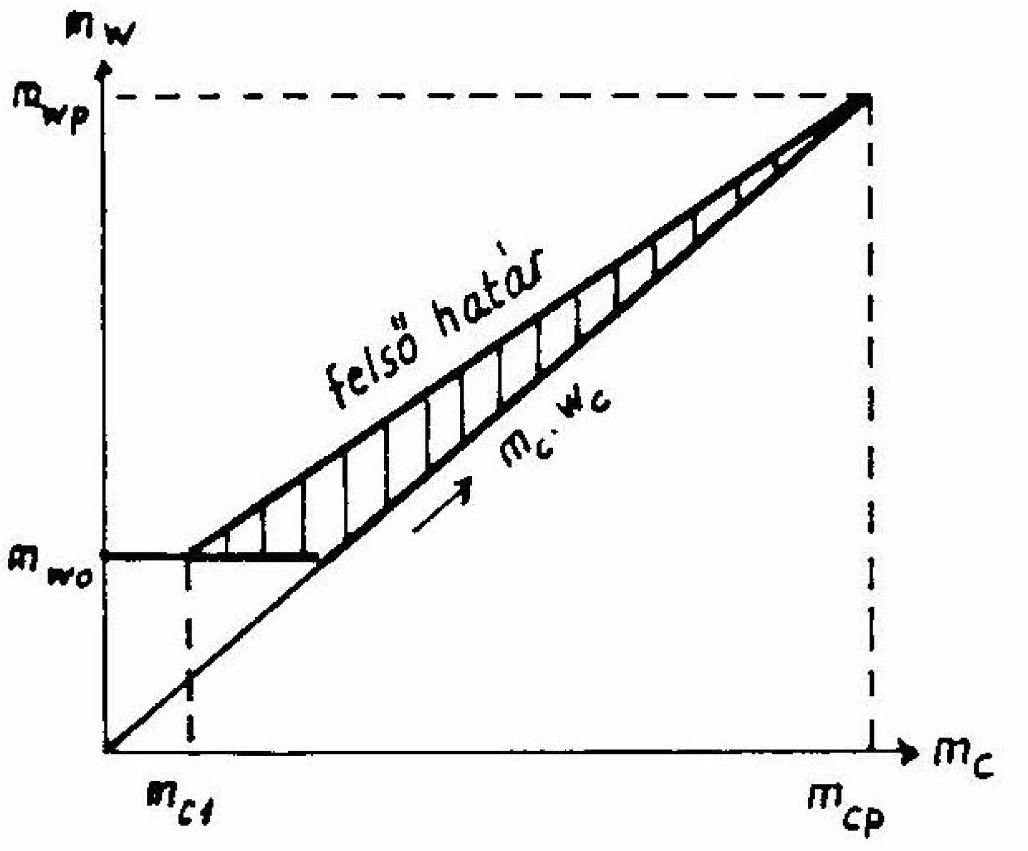
A 4. ábrából az tűnik ki, hogy FERET [11], BOLOMEY [12] és SUENSON [18] által megadott összefüggésektől eltekintve a többi vízigénybecslő képlettel azonos tendenciájú víztartalom-változás számítható, és a számított értékek eltérése a finomsági modulus növekedésével csökken (*m* = *4,5* mellett ± *30 liter/m*^{3}, *m* = *7* mellett ± *20 liter/m*^{3}). Ez azt jelentheti, hogy a különböző módszerek főleg a leggyakrabban használt, közepes és jobb minőségű adalékanyagokra illeszkednek, míg szélsőséges szemeloszlásokra kevésbé (feltételezhető, hogy szélsőséges szemeloszlásokat ritkábban, vagy egyáltalán nem vizsgáltak). A számítások azonban még a legjobb esetben is kb. két konzisztencia osztálynak megfelelő eltérést adnak a vízadagolásban. Ez akkor is túlzott, ha a különböző módszerek kialakításához felhasznált alapanyagok eltérő minőségét és a konzisztencia vizsgálatok eltérő módszereit is számításba vesszük. Szüksége ezért a keverővíz becslésének a pontosítása.

A 3.2. fejezetben a vízigény meghatározására végzett kísérleteimet ismertetem.

3.2. Kísérletek a vízigény meghatározására

3.2.1. A vízigénybecslés pontosításának a feltételei

A betonkeverékekben egymástól jól elkülöníthető méretű szemcsecsoport a cement (μm) és az adalékanyag (mm), következésképpen eltérőek a benedvesítendő felületek is, amelyek korrelációja a vízigénnyel kétségtelen. Határeseteket felvéve a benedvesítendő száraz szemcsehalmaz lehet tisztán cement vagy tisztán adalékanyag. Ha meghatározható az azonos konzisztenciájú (bedolgozhatóságú) cement-víz keverék (cementpép) és adalékanyag-víz keverék vízigénye, akkor a határesetekre szabatos adatokat nyerhetünk. Ezután lehet megvizsgálni, hogy a cement : adalékanyag arány változása két szélső érték között milyen függvénykapcsolatban van a vízigénnyel. Ennek a gondolatmenetnek a vázlata az 5. ábrán látható.



5. ábra

Az m_w = *f* (m_c) függvénykapcsolat feltételezhető határai részben korábbi vizsgálatok alapján, részben logikai úton kijelölhetők.

A [20] – [21] és a [26] –[27] képletek alapján várható, hogy valamely m_{c1} cementtartalomig a keverék víztartalma csak az adalékanyag m_{wo} vízigényétől függ, ezért az m_w = *f* (m_c) összefüggésnek kezdeti vízszintes szakasza van.

Az összefüggés felső határa a vízszintes szakasz végpontjának és az adott konzisztenciájú cementpép víztartalmát jelző pontnak az összekötő egyenese, alsó határa pedig az m_{wo} vízszintesének és az $m_c.w_c$ ferde egyenesnek a metszéspontjából a cementpép víztartalmáig tartó $m_c.w_c$ ferde egyenes-szakasz. A függvénygörbe tehát valószínűleg az 5. ábrán sraffozással jelzett területen belül lehet.

A konkrét szélső értékek számításhoz meg kell vizsgálni a különböző konzisztenciájú cementpépek vízigényét. Ha a pép cementtartalma m_{co} *kg/m*^{3}, víz-cement tényezője x_p és a cement sűrűsége ρ_c *t/m*^{3}, akkor 1 m^3 = 1000 liter tömör cementpépre fennáll, hogy

$$1000 = \frac{m_{cp}}{\rho_c} + m_{cp} \times x_p = m_{cp} \times \left(\frac{1}{\rho_c} + x_p \right) \quad \text{liter/m}^3 \tag{25}$$

ezért

$$m_{cp} = \frac{1000}{\frac{1}{\rho_c} + x_p} \quad \text{kg/}^3 \tag{26}$$

és

$$m_{wp} = x_p \times m_{cp} \quad \text{kg/m}^3 \tag{27}$$

Ha pl. ρ_c = *3,1 t/m³* és kissé képlékeny konzisztencia mellett $x_p = w_c = 0{,}24$, akkor m_{cp} = *1000 :[(1 : 3,1) + 0,24] = 1777,5 kg/m³* és m_{wp} = *1777,5 × 0,24 = 426,6 kg/m³.*

Az egységnyi térfogatú adalékanyag – víz keverék összetételének a számításához meg kell vizsgálni a különböző konzisztenciájú keverékek w_a vízigényét (tömegrész). Ha a keverék adalék-anyag tartalma m_{ao} *kg/m³* , vízigénye w_a *tömegrész* és az adalékanyag sűrűsége ρ_a *t/m³* , akkor 1 m³ = 1000 liter térfogatra fennáll, hogy

$$1000 = (m_{ao} : \rho_a) + w_a \times m_{ao} + V_l \qquad \text{liter/m}^3 \qquad (28)$$

ahol V_l a jól tömörített víz-adalékanyag keverék levegőtartalma, *liter/m³*. A (28) képletből:

$$m_{ao} = \frac{1000 - V_l}{\dfrac{1}{\rho_a} + w_a} \qquad \text{kg/m}^3 \qquad (29)$$

és

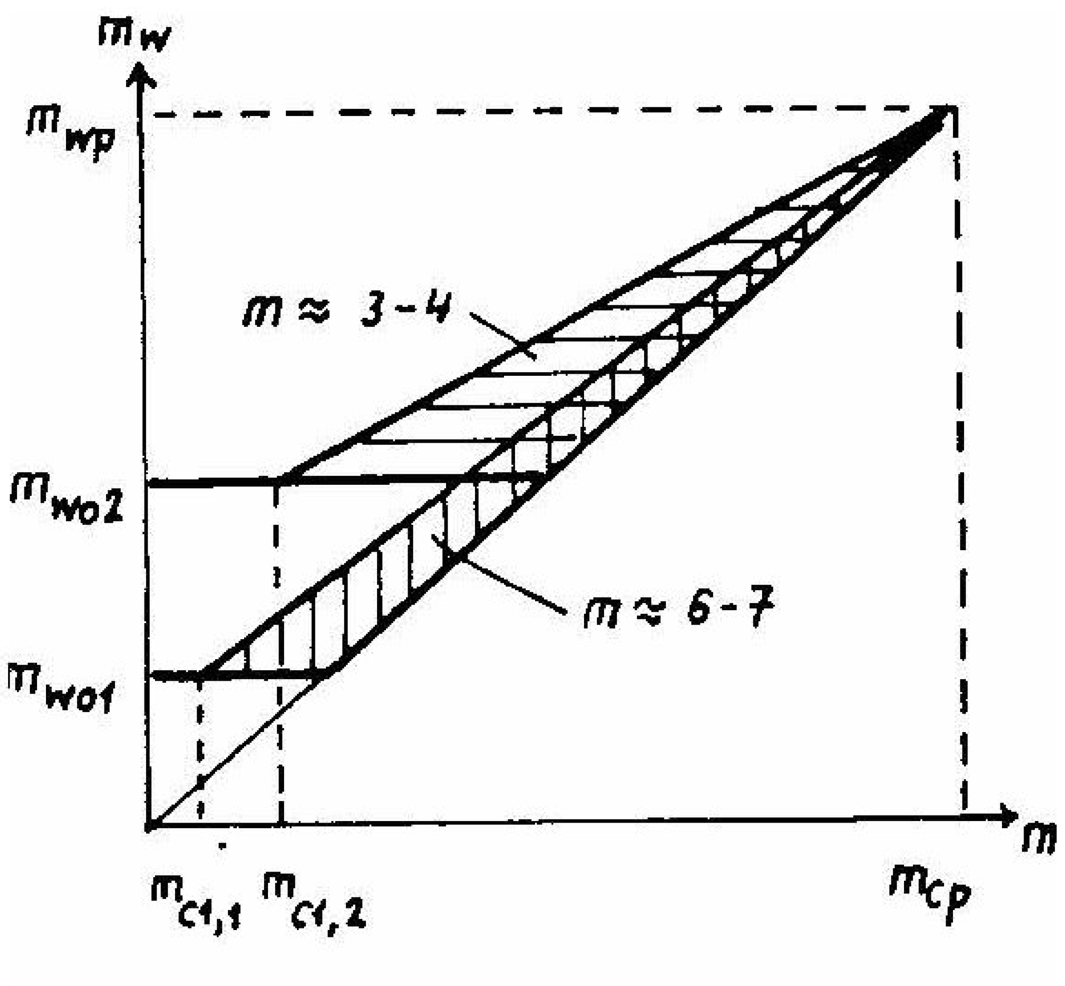
$$m_{wo} = m_{ao} + w_a \qquad \text{kg/m}^3 \qquad (30)$$

Ha pl. ρ_a = *2,64 t/m³* és kissé képlékeny konzisztencia mellett w_a = *0,06 tömegrész*, továbbá tömörítés után a víz-adalékanyag keverék levegőtartalma V_l = *100 liter/m³*,akkor:

m_{ao} = *(1000 – 100) : [(1 : 2,64) + 0,06] = 2051,1 kg/m³* és m_w = *2051,1 × 0,06 = 123,1 kg/m³.*

Megjegyzendő, hogy amíg a jól tömörített tiszta cementpép mindig pórusmentes ($V_l = 0$), addig a víz-adalékanyag keverékekben tökéletes tömörítés után is mindig marad levegő ($V_l > 0$).

Az 5. ábrából vizsgálatok nélkül is következtetni lehet arra, hogy változatlan minőségű cementtel készített, adott konzisztenciájú, de különböző szemeloszlású adalékanyagokat tartalmazó keverékek szélső értékei közül a cementpép m_{wp} víztartalma állandó, de a víz-adalékanyag keveréké ($m_c = 0$) a finomsági modulus csökkenésével (a homoktartalom növekedésével) növekszik. Ebből következik, hogy az m_{c1} és m_{cp} értékekhez tartozó víztartalmakat összekötő, egyelőre ismeretlen függvények meredeksége annál nagyobb, minél kisebb a finomsági modulus. A durvább szemcsékből álló adalékanyagokból készített betonok víztartalma tehát jobban kell, hogy függjön a cementtartalomtól, mint a finomabb szemcséket tartalmazó (nagyobb vízigényű) adalékanyagokkal készítetteké. Ezt a tendenciát mutatja a 6. ábra.



6. ábra

A cementpép, a víz-adalékanyag keverék és a két szélső eset között bármilyen összetételű betonkeverék vízigényének a vizsgálatát csak akkor lehet szabatosan, reprodukálható módon elvégezni, ha a konzisztenciát minden esetben azonos módszerrel lehet meghatározni. Másképpen kifejezve: a konzisztenciával összefüggő valamely anyagjellemzőt kell ellenőrizni, és ennek értékét a cementpépre, a betonkeverékekre és a víz-adalékanyag keverékre egyaránt azonos szinten kell tartani.

Az általánosan használatos konzisztenciavizsgáló eszközök mindegyike a friss betonkeverék más-más anyagjellemzőjét méri: az állékonyságot roskadással, a mozgékonyságot terüléssel, a tömörödési hajlamot RILEM-készülékkel, a belső súrlódást HUMM-szondával, a péptartóképességet VEBE-mérővel stb. ellenőrizhetjük. Bizonyítás nélkül is belátható, hogy a felsorolt valamennyi eszköz csak akkor használható, ha a keveréknek van némi összetartóképessége és állékonysága. A víz-adalékanyag keverék azonban – eltekintve néhány szélsőségesen nagy finomhomok- vagy agyag-tartalmú szemcsés halmaztól – szétpereg, így „konzisztenciája” az ismert eszközökkel nem vizsgálható.

Több vizsgálat [29] – [31] kimutatta azt is, hogy eltérő cementtartalmak mellett még a betonösszetételek szokványos tartományaiban is változhat az ugyanolyan bedolgozhatóságú keverékek mérőszáma. Például azonos roskadású betonkeverékekkel nagy k_{CF} mérhető kis cementtartalommal, ill. kis k_{CF} mérhető nagy m_c mellett, vagy változatlan tömörödési mérőszámhoz kis m_c-hez nagyobb k_V (VEBE-szám) tartozik, mint nagy m_c-hez. Ez is mutatja a különböző összetételű betonkeverékek összevethető konzisztencia vizsgálatának, ill. szabatos konzisztencia-beállításának a nehézségeit.

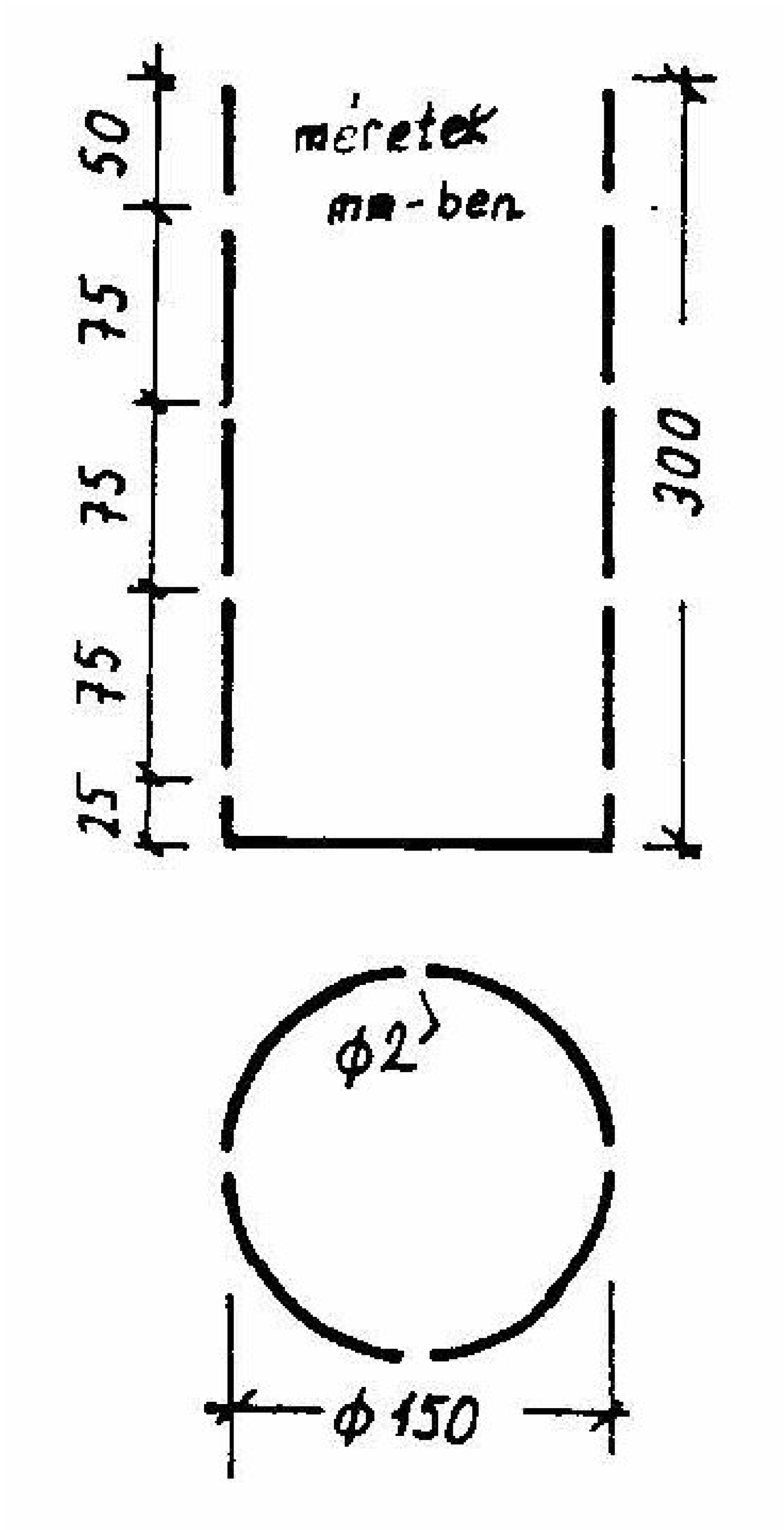
Ezekből következik, hogy az eddig ismertektől eltérő konzisztencia-vizsgálati módszert kellett keresni, ha szélsőséges összetételű keverékek konzisztencia-azonosságát kívánjuk ellenőrizni.

A betonkeverék bedolgozhatóságának egyik jellemzője a víztartó képesség: a betont addig kellene tömöríteni, amíg el nem éri a maximális tömörségét, de csak addig szabad, amíg a víz elfolyása (a keverék szétosztályozódása) meg nem kezdődik. A különböző összetételű betonkeverékek víztartó képességének a mérésére egyszerű eszköz készíthető: a nyomószilárdság vizsgálatára készített hengerpróbatestek sablonjának a palástját a 7. ábrának megfelelően kell perforálni. A vízzel kevert szemcsés halmazt a sablonba töltve, majd laboratóriumi asztalvibrátoron vibrálva reprodukálható módon ellenőrizhető az az időpont, amikor a vízelfolyás a furatokon át elkezdődik. A secundumban kifejezett vibrálási időigény jelölése: k_s. A vizsgálat során ügyelni kell arra, hogy a vibrálás hatására eltávozó levegő vízcseppeket is magával ragadhat s ezért a furatok felületén szétpattanó vízbuborékok jelenhetnek meg, megelőzve a víz folyamatos eltávozását.

A szemlélettel megállapítható konzisztenciákat az egyéb konzisztencia-mérő eszközökkel kapott eredményekkel összevetve a szemcsés halmazok konzisztenciája a víztartó képesség alapján az alábbi tömörítési időtartamokkal jellemezhető:

- alig földnedves konzisztencia: $k_s >$ 30 s
- földnedves konzisztencia: $k_s =$ 20 – 30 s
- kissé képlékeny konzisztencia: $k_s =$ 6 – 15 s
- képlékeny konzisztencia: $k_s =$ 1 – 3 s
- folyós konzisztencia: $k_s =$ 0,1 – 1 s
- önthető konzisztencia: $k_s <$ 0,1 s

A 3.2.2. fejezetben ismertetett eredmények a víztartóképességgel jellemzett konzisztencia fent leírt vizsgálatából származnak.



7. ábra

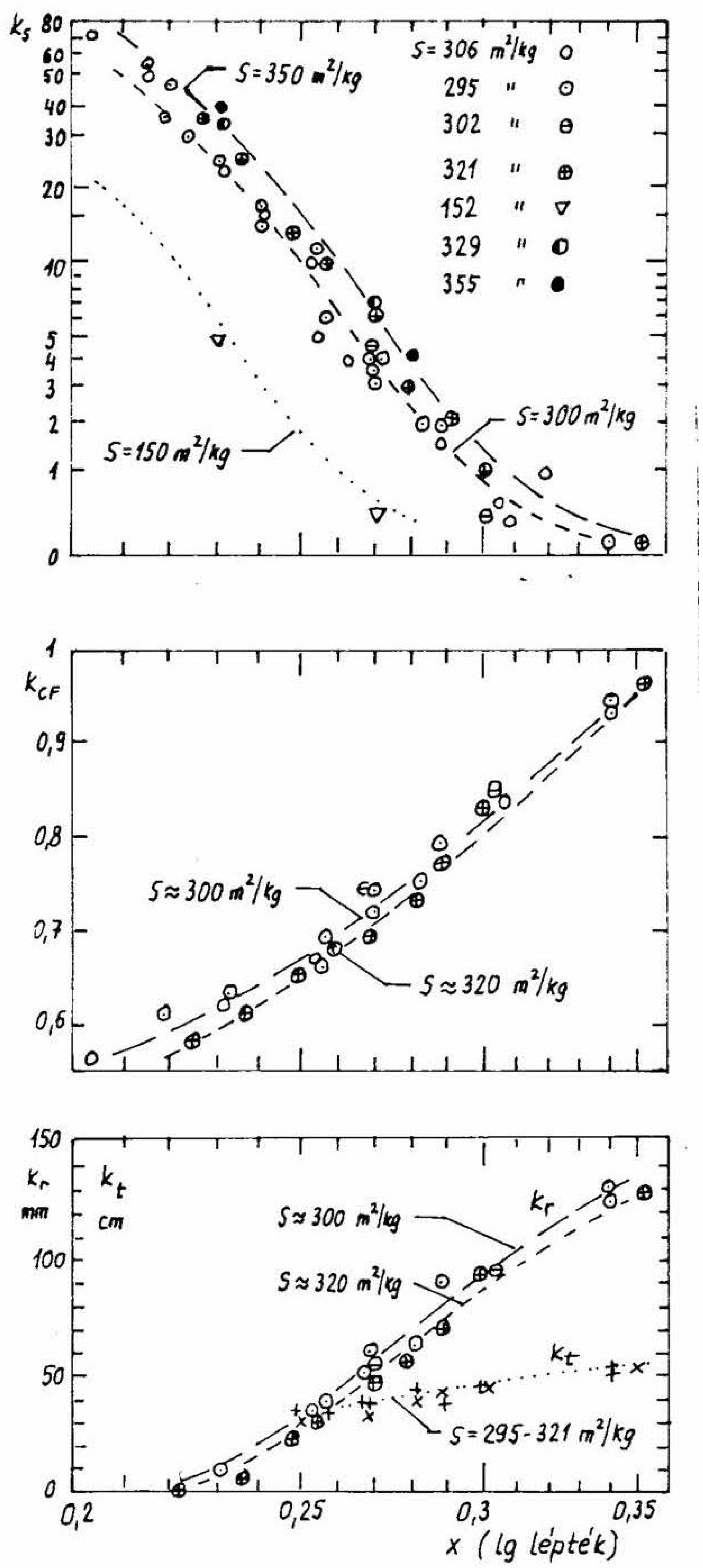
Az 5. ábra szerinti szélső értékek (m_{wo} és m_{wp}) meghatározására az alapanyagokat külön-külön ellenőriztem, ezt követően különböző összetételű betonkeverékeket vizsgáltam. Valamennyi vizsgálat során a száraz adalékanyagokhoz fokozatosan növekvő mennyiségű vizet kevertem és 5 percen belül ellenőrizem a konzisztenciát.

A cement vízigényét váci 350 kspc 0 (S = 295 – 306 m²/kg) és váci 450 pc (S = 321 m²/kg) cementekkel állapítottam meg. Eredményeim első összefoglalását 1988 évben publikáltam [38]. A vizsgálatok adatait az 1. táblázat[1] tartalmazza, ahol SZEGŐ [32] néhány kísérleti gyártásból származó, különböző fajlagos felületű cementekkel végzett vizsgálatainak az eredményeit is megadtam. Valamennyi pépnek ellenőriztem a k_s víztartó képességét, néhány kivételtől eltekintve mértem a k_{CF} tömörödési tényezőt, továbbá a pépek kb. felének k_r roskadását és k_t terülését is megállapítottam. A 8. ábrán az *x* víz-cement tényező függvényében foglaltam össze a különböző víztartalmú pépek konzisztencia-mérőszámait.

A 9. ábrán a különböző konzisztencia mérő-számok összefüggését mutatom be.

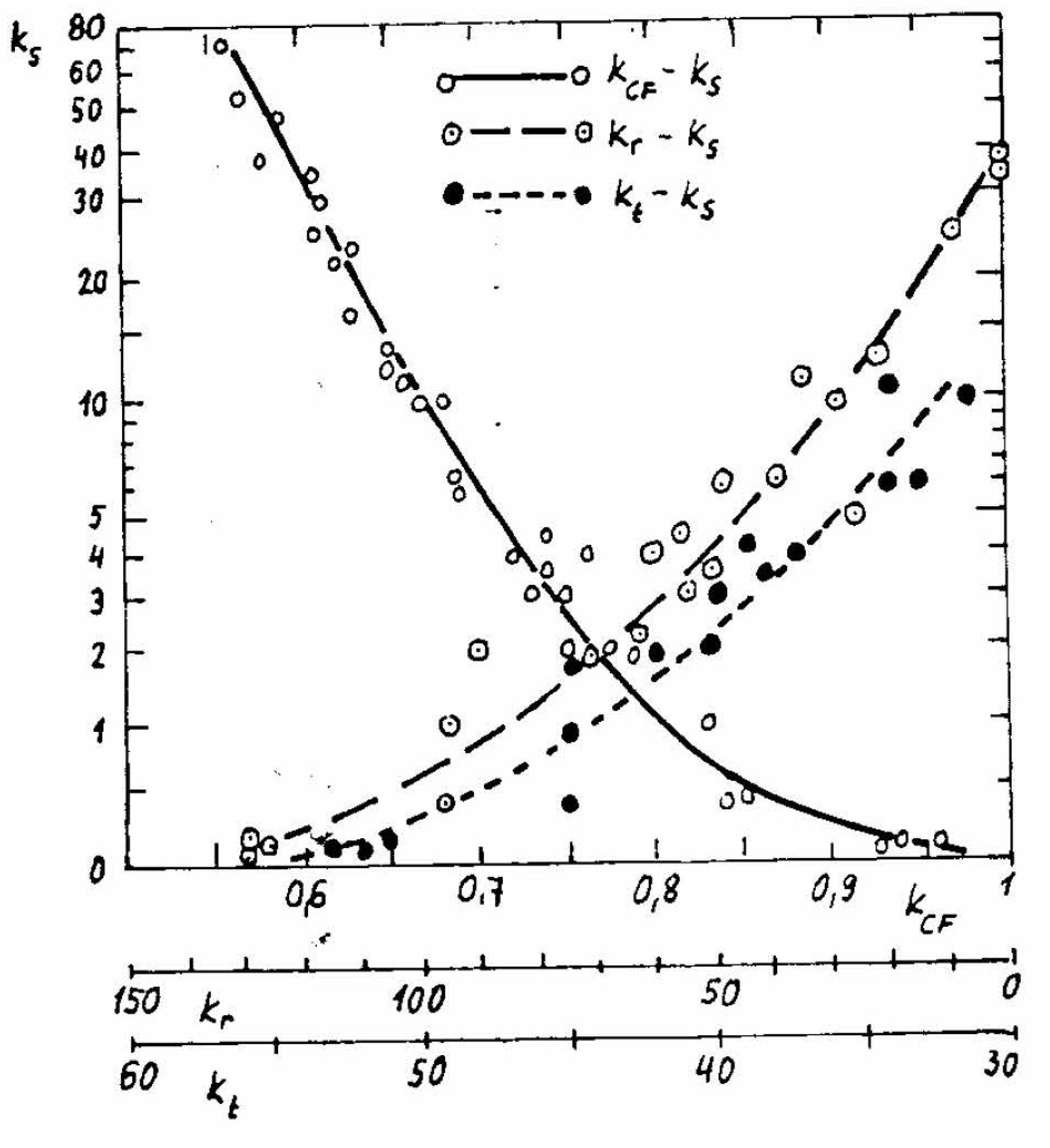
A homokos kavics víztartó képességét *D = 32 mm, m = 3,4 – 9* és *U = 1,5 – 100* jellemzőjű keverékekkel ellenőriztem. Számos esetben vizsgáltam azonos finomsági modulusú, de eltérő szemeloszlású adalékanyagokat a 10. ábrának megfelelően, ill. egyszemcsés (*U = 1,5*) keverékeket. Az adalékanyag víztartó képességgel mért konzisztenciájának a vizsgálati eredményeit első ízben 1981-ben foglaltam össze [33].

Kezdetben csak az adalékanyag-víz keverékeit ellenőriztem, később a [20]-[21] és a [26]-[27], valamint korábbi saját vizsgálataim [34]–[35] tapasztalatai alapján $m_c \leq 130\ kg/m^3$ cementtartalmú, sovány betonkeverékeket is bevontam a kísérletekbe (a sovány keverék ugyanis nem igényel

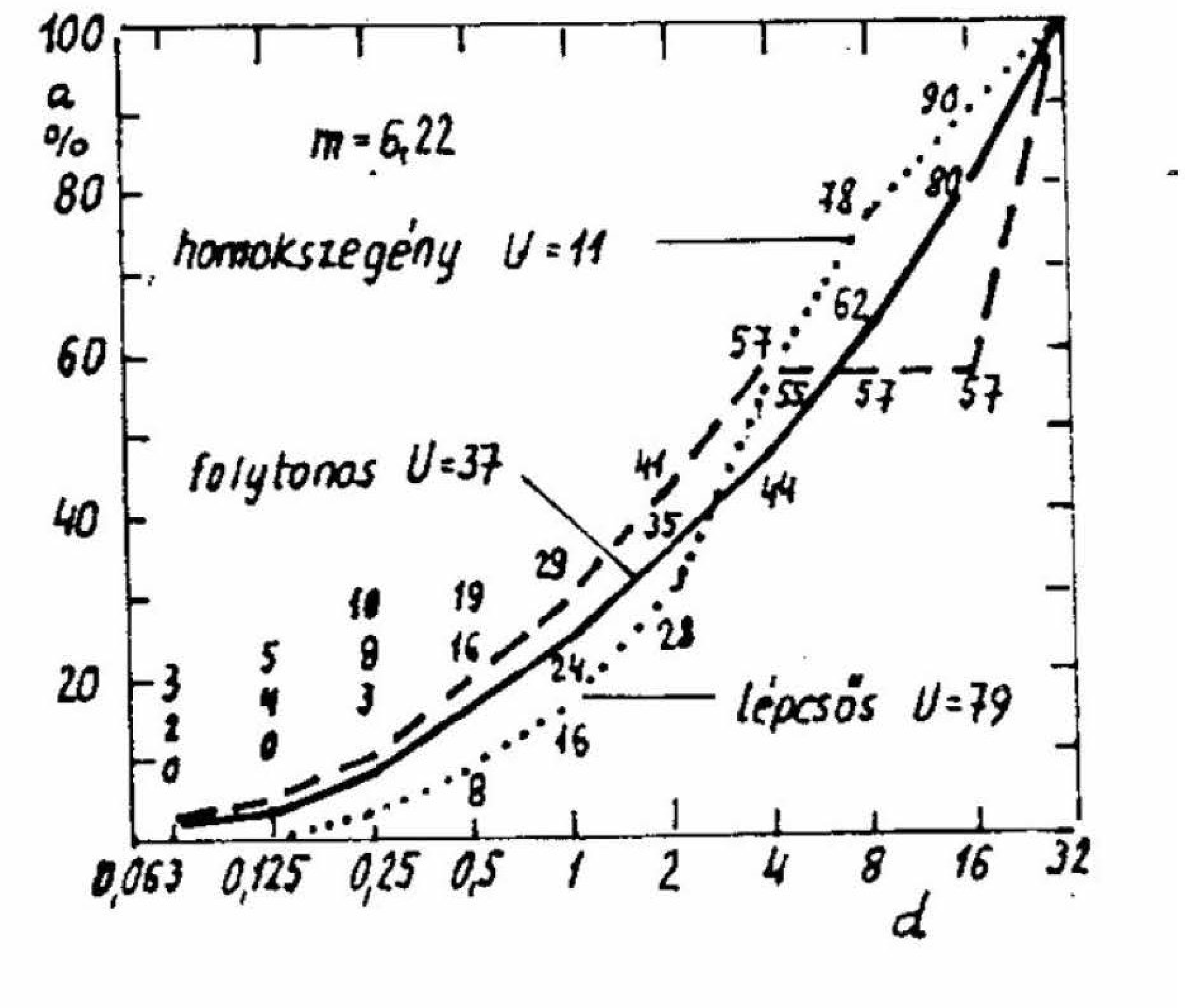


8. ábra

[1] Megjegyzés: A számozott táblázatok *dr. Ujhelyi János* saját vizsgálatainak eredményeit tartalmazzák, és ez (1. – 10. táblázat) az internetes közlés második részében találhatók. Az internetes közlés ezen első részéb található táblázatoknak nincs számozása, azokban dr. Ujhelyi János az irodalomból vett képletekkel végz számításai eredményeit mutatja be. (KT.)



9. ábra

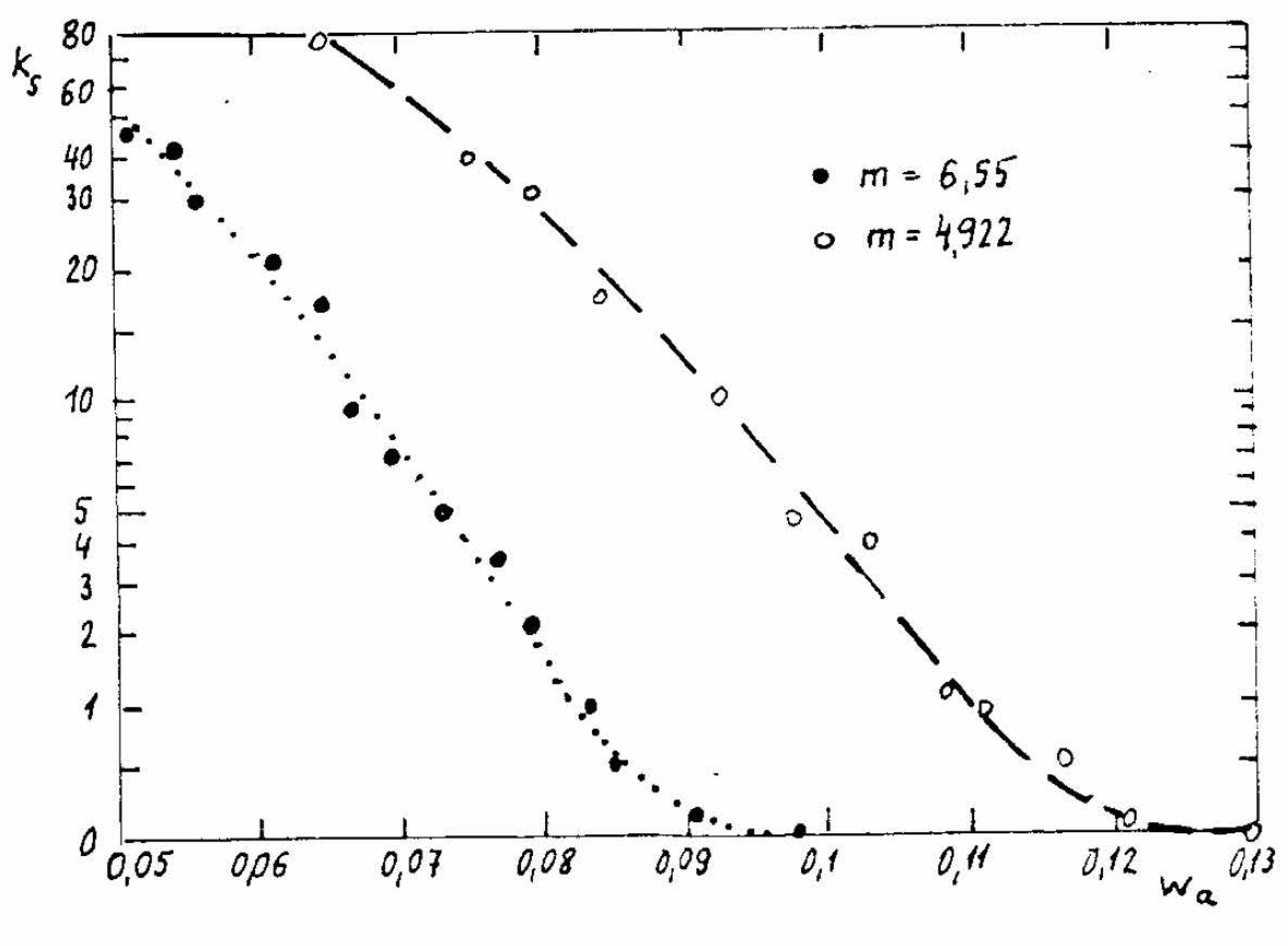


10. ábra

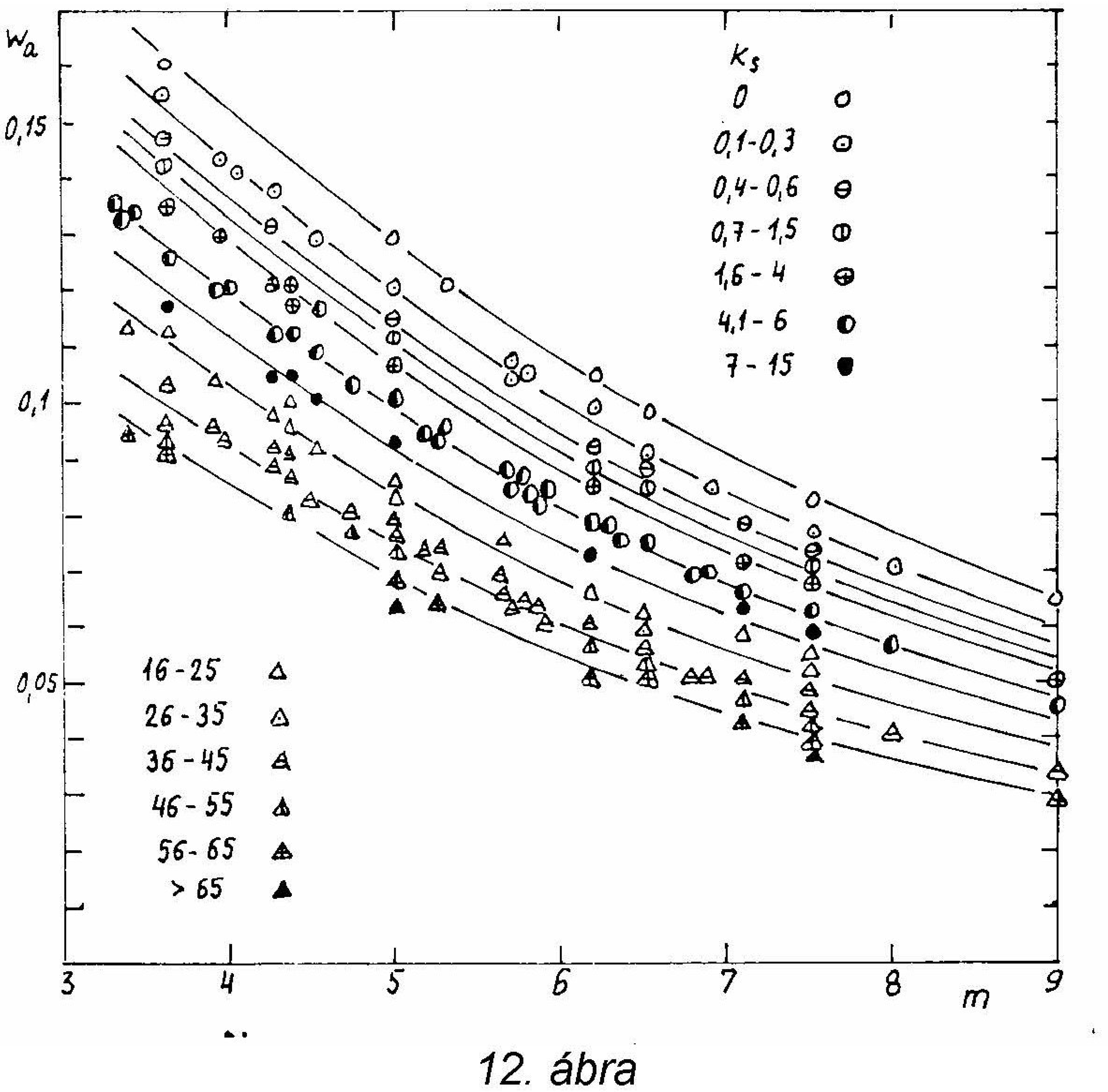
több vizet adott konzisztenciához, mint az adalékanyag-víz keverék). Az eredmények feldolgozásának jellegzetes módját a 11. ábrán mutatom be.

Vizsgálataim nagy száma miatt az adatokat táblázatban nem foglaltam össze (meg kell jegyezzem, hogy mint-egy tíz éven át valamennyi laboratóriumi kísérlet során ellenőriztem a készített betonkeverékek víztartó képességét), hanem az adatokat csak a 12. ábrán mutatom be, ahol valamennyi kísérlet eredményét feltüntettem a finomsági modulus függvényében.

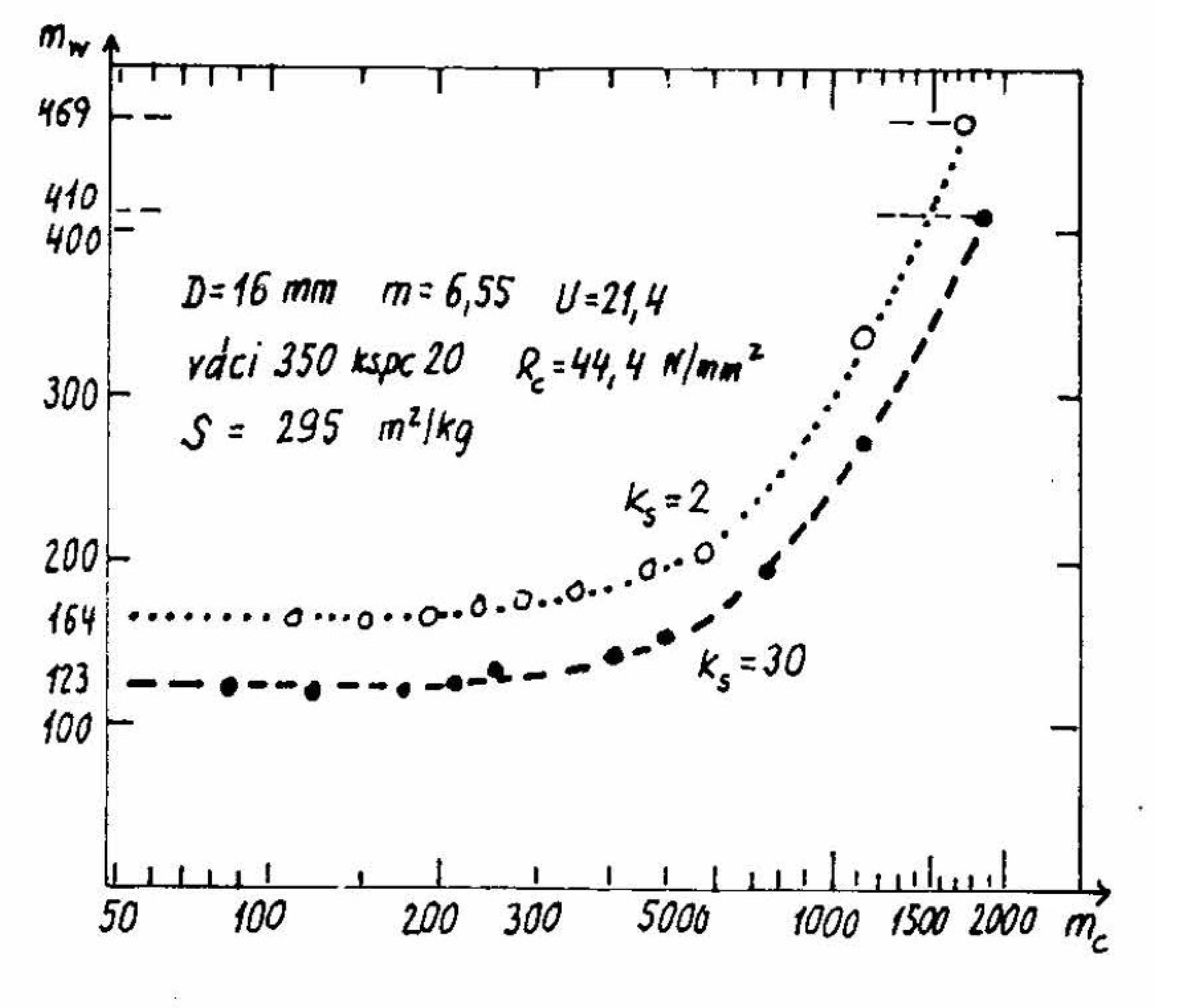
A betonkeverékek konzisztenciáját általában a víztartó képességgel és a tömörödési mérőszámmal határoztam meg. Korábbi vizsgálataim adatait a [34]–[38]–ban részleteztem, legújabb kísérleteim adataiból néhányat a 2. táblázatban foglaltam össze. Az 5. ábra elveinek megfelelően szerkesztettem meg a 13. ábrát a 2. táblázat adataiból.



11. ábra



12. ábra



13. ábra

A 2. táblázattal és a 13. ábrával kapcsolatban meg kell jegyeznem, hogy ezekben csak az azonosan k_s = *30 s* és

k_s = 2 s víztartó képességű keverékek adatai láthatók: a kísérletek alkalmával egy-egy adott víz-cement tényezővel több, változó cement- és víztartalmú keveréket kellett ellenőriznem, amíg szabatosan azonos konzisztenciát sikerült elérnem.

3.2.3. Az eredmények értékelése, megállapítások

A 8. ábra a cementpépek w_c vízigényének és a k_s víztartóképességgel mért konzisztenciának az összefüggését mutatja be. Az adatokra jól illeszkedik az alábbi függvény:

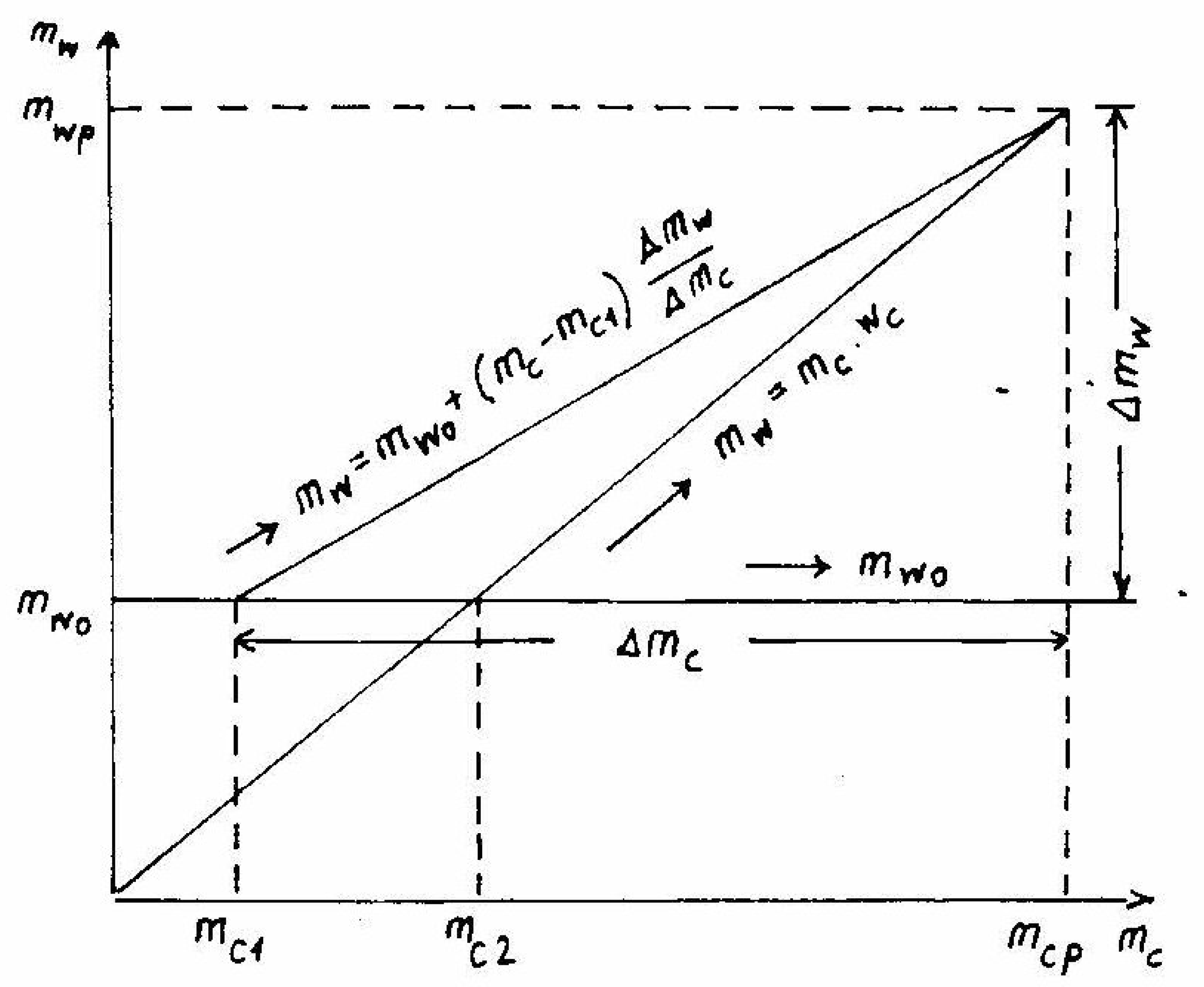
$$w_c = [0{,}3 + 0{,}00028 \times (S - 100)] \times e^{-0{,}35\times(0{,}1\times k_s)^{0{,}25}} \quad \textit{tömegrész} \qquad (31)$$

A 12.ábrán a homokos kavics finomsági modulustól függő vízigénye látható a víztartó képességgel mért különböző konzisztenciák mellett. Az ábra adataira jól illeszkedik az alábbi függvény:

$$w_a = A \times e^{-B\times m} \quad \textit{tömegrész} \qquad (32)$$

ahol $A = 0{,}3 \times e^{-0{,}22\times(0{,}1\times k_s)^{0{,}35}}$ és $B = 0.17 \times e^{0{,}13\times(0{,}1\times k_s)^{0{,}32}}$

A 13. ábra a betonkeverékek jellegzetes vizsgálati eredményeit foglalta össze. Valamennyi kísérleti adatom alapján szerkesztettem meg a 14. ábrát, amely alkalmas bármilyen adalékanyaggal, cementtel, cementtartalommal és konzisztenciával készítendő betonkeverék vízadagolásának szabatos meghatározására, igazolja továbbá az 5. ábra szerinti hipotézist is.



14. ábra

A 14. ábrán a következő <u>cementtartalmakat</u> lehet kijelölni:

- $\boldsymbol{m_{c2}}$ = az a cementtartalom, amelyre fennáll, hogy $m_{wo} = m_{c2} \times w_c$, tehát $m_{c2} = \frac{m_{w0}}{w_c}$ kg/m³ (33)
- $\boldsymbol{m_{c1}}$ =az a cementtartalom, amely mellett adott konzisztencia elérésére még elegendő $m_w = m_{wo}$ vízmennyiséget adagolni. Vizsgálati eredményeim szerint jó közelítéssel: $m_{c1} = \frac{m_{c2}}{3}$ kg/m³ (34)
- $\boldsymbol{m_{cp}}$ = az adott konzisztenciájú cementpép cementtartalma a (31)-ből és a (26)-ból számítva, kg/m³

A 14. ábrán a következő <u>jellemző víztartalmakat</u> lehet kijelölni:

➢ $\boldsymbol{m_{wo}}$ =az adott konzisztenciájú adalékanyag keverék, ill. az $m_c \le m_{c1}$ cementtartalmú betonkeverék szükséges víztartalma:

$$m_{wo} = m_{ao} \times w_a \quad kg/m^3 \qquad (35)$$

ahol m_{ao} =az adott konzisztenciájú adalékanyag-víz keverék mértékadó adalékanyag tartalma, kg/m³ (számításának a módját a 4.2.3. fejezet tartalmazza),

➢ $\boldsymbol{m_{wp}}$ = az adott konzisztenciájú cementpép szükséges víztartalma [számítása a (31)-ből és a (27)-ből].

A 14.ábrán a következő <u>jellemző differenciákat</u> lehet találni:

❖ $\boldsymbol{\Delta m_w}$ = az adott konzisztenciájú cementpép és adalékanyag szükséges víztartalmának a különbsége:

$$\Delta m_w = m_{wp} - m_{wo} \quad kg/m^3 \qquad (36)$$

❖ $\boldsymbol{\Delta m_c}$ = az adott konzisztenciájú pép cementtartalmának és az m_{c1} cementtartalomnak a különbsége:

$$\Delta m_c = m_{cp} - m_{c1} \quad kg/m^3 \qquad (37)$$

A 14. ábrán a következő <u>jellemző egyenesek</u> szerkeszthetők meg:

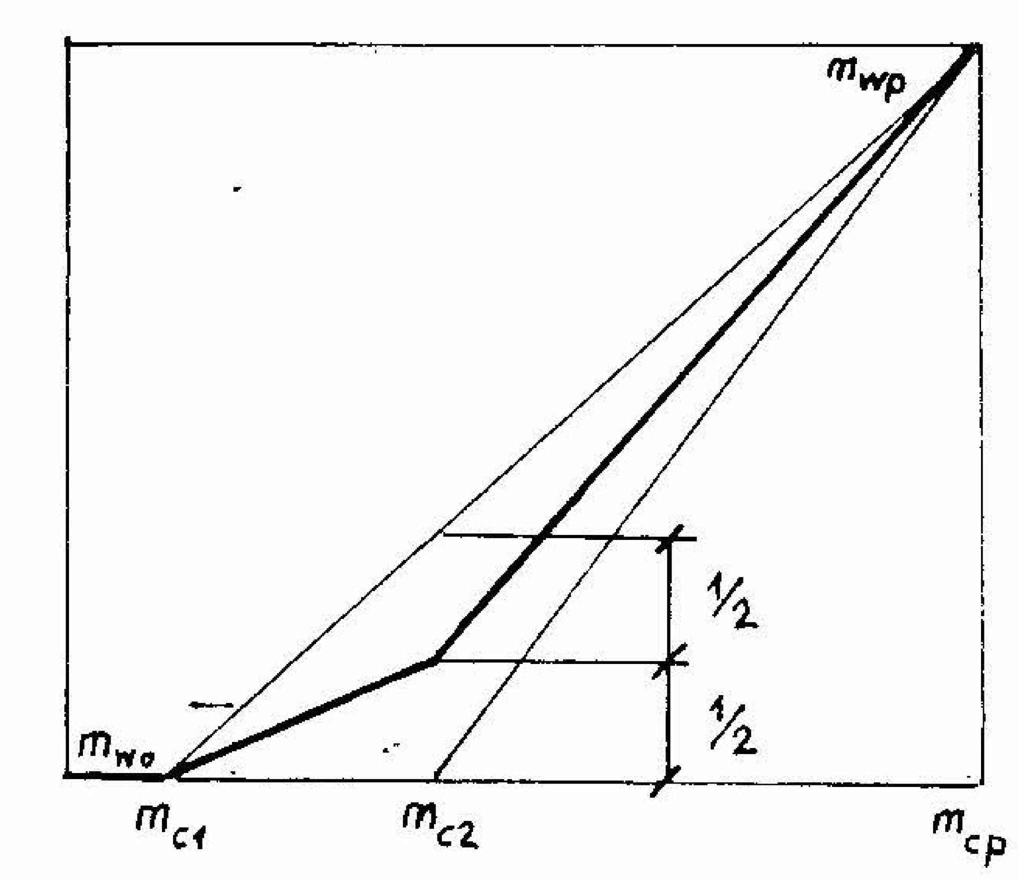
✓ az m_{wo} – hoz tartozó vízszintes egyenes

✓ az $m_w = 0$ és az $m_w = m_{wp}$ pontokat összekötő ferde egyenes, amelynek egyenlete: $m_w = m_c \times w_c$,

✓ az $m_{c1} = m_{wo}$ metszéspontját az m_{wp} ponttal összekötő ferde egyenes, amelynek egyenlete:

$$m_w = m_{wo} + (m_c - m_{c1}) \times \frac{\Delta m_w}{\Delta m_c} \quad kg/m^3 \qquad (38)$$

Vizsgálataim azt bizonyították, hogy adott konzisztenciájú betonkeverék víztartalma $m_c > m_{c1}$ mellett olyan görbére illeszkedik, amely jól helyettesíthető a 15.ábra szerinti egyenesekkel. Az egyenesek töréspontja az m_{c2} függőlegesében az m_{wo} vízszintese és a (38) szerinti ferde egyenes közötti függőleges távolság felezőpontjába található. A 15. ábrának megfelelően $m_{c1} \leq m_c \leq m_{c2}$ cementtartalom mellett a betonkeverék szükséges víztartalma:



15.ábra

$$m_w = m_{wo} + \frac{(m_c - m_{c1}) \times \frac{\Delta m_w}{\Delta m_c}}{2} \quad kg/m^3 \qquad (39)$$

míg $m_c > m_{c2}$ cementtartalom mellett:

$$m_w = m_{wo} + \frac{(m_c \times w_c - m_{wo}) + (m_c - m_{c1}) \times \frac{\Delta m_w}{\Delta m_c}}{2} \quad kg/m^3 \qquad (40)$$

4. AZ ADALÉKANYAG TÖMÖRSÉGE ÉS PÉPIGÉNYE

A beton összetételének a tervezésekor a cement, az adalékanyag s a víz szükséges mennyiségét kell meghatározni az előírt követelmények kielégítésére. Első közelítésben feltételezzük: képesek vagyunk a betonkeveréket a zsaluzatba úgy bedolgozni, hogy az a lehető legtömörebben helyezkedjék el, azaz nem marad benne levegő az elégtelen tömörítés miatt. A tömör állapotnak megfelelő betonösszetételt akkor számíthatjuk ki szabatosan, ha ismerjük azt az adalékanyag mennyiséget, amelyet egységnyi térfogatba be lehet dolgozni, azaz ha ismerjük az adalékanyag-halmaz tömörségét.

Az adalékanyag halmaz tömörsége a halmaz hézagmentes térfogatának (V_T) és halmaztérfogatának (V_H) a hányadosa:

$$T = \frac{V_T}{V_H} \qquad (41)$$

Ha a halmaz térfogata $V_H = 1\ m^3$ (= 1000 liter), akkor V_T értéke az 1 m^3 térfogatba tömöríthető adalékanyag szemcsetérfogatát adja meg. Ha a szemcsék pórustartalma zérus (ez a homokos kavicsokra gyakorlatilag fennáll), akkor V_T az adalékanyag tömör térfogatát is kifejezi.

FERET [11] és ABRAMS [16] óta uralkodik az a felfogás, hogy az a szemcsehalmaz legjobb a beton készítéséhez, amelynek tömörsége a legnagyobb. A szemcsés halmazok tömörségét számos tényező befolyásolja: egyrészt a halmaz jellemzői, mint a legnagyobb szemnagyság, a szemalak, a szemcsefelület és a szemeloszlás, másrészt a vizsgált körülményei, mint a halmaz nedvességtartalma, tömörítésének a módja és a vizsgáló eszköz (sablon). Ezek a tényezők egymással kölcsönhatásban is vannak, ezért nehéz a tömörség változását meghatározó tényezők egyértelmű megállapítása, bár vizsgálatával számosan foglalkoztak.

Már korábban bizonyítottuk, [34], [38], hogy az 1 m^3 betonba adott szemeloszlású adalékanyagból bedolgozható V_{ao} $liter/m^3$ térfogat, ill. az ebből számítható

$$V_{po} = 1000 - V_{ao} \quad liter/m^3 \qquad (42)$$

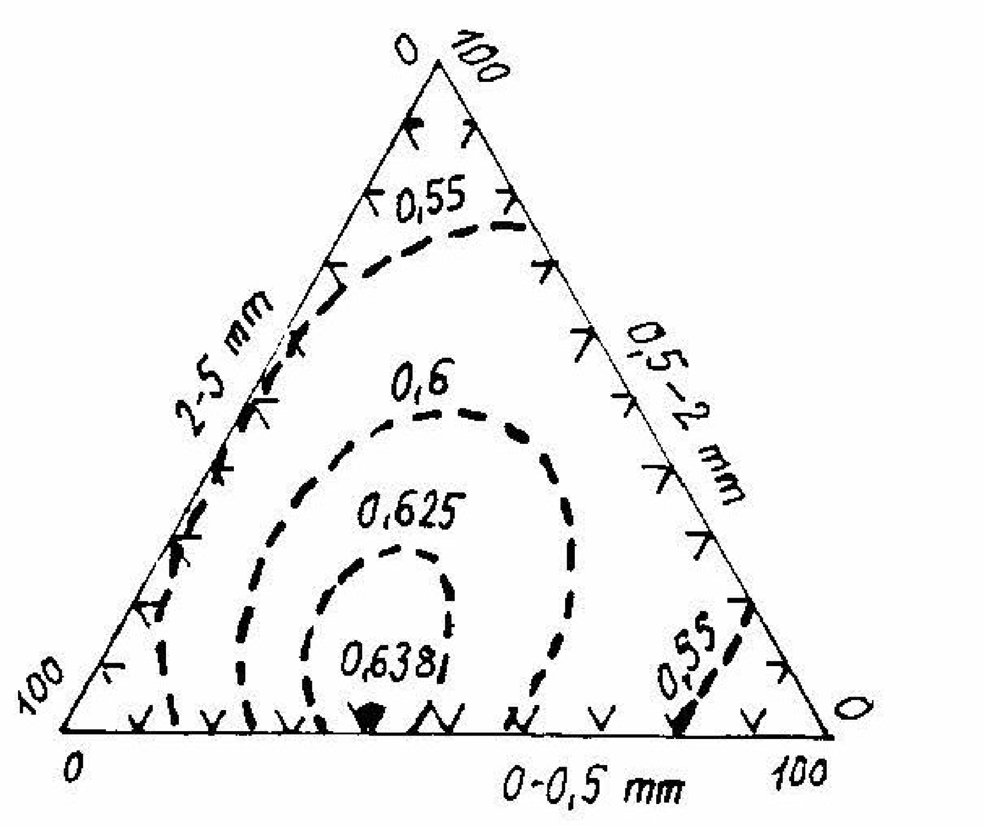
cementpép-térfogat a beton nyomószilárdságát meghatározó módon befolyásolja: adott víz-cement tényező mellett annak a betonnak a legnagyobb a nyomószilárdsága, amelyben $V'_p = V_{po}$, azaz a tényleges cementpéptartalom a (42)-ből számított pépigénnyel egyenlő (bizonyítását lásd dolgozatom 6.3.3. fejezetében).

Az adalékanyag halmaz tömörségének megbízható ismerete tehát két szempontból lényeges: az 1 m^3 betonba tömöríthető adalékanyag-térfogat számítása érdekében, amely a betonösszetétel

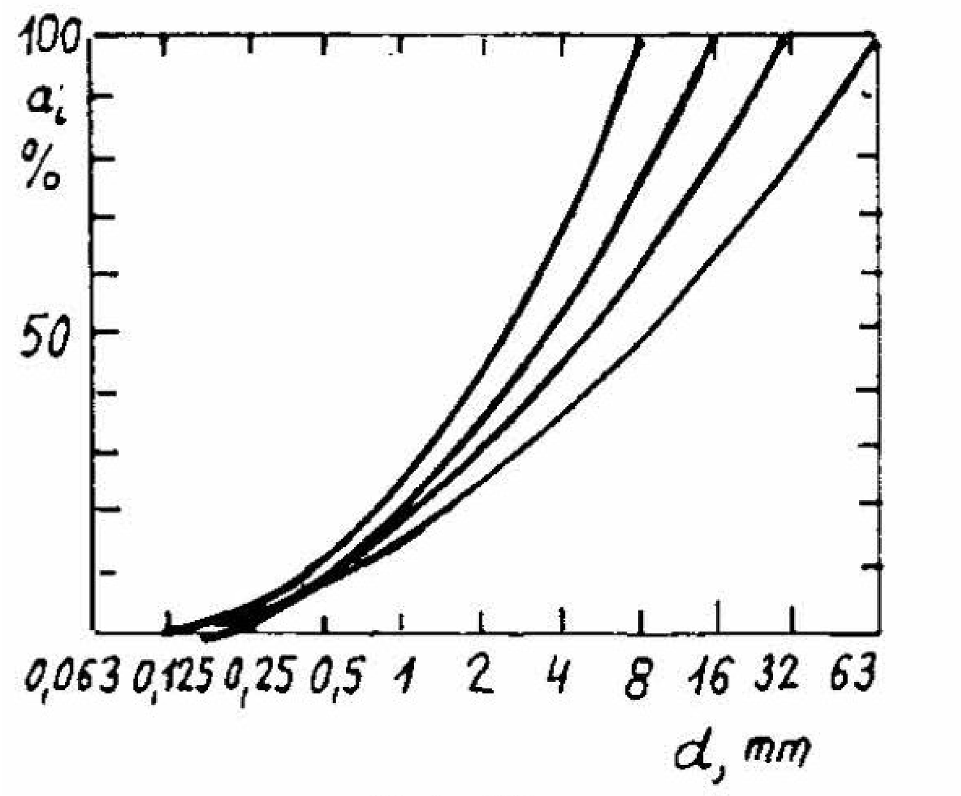
szabatos meghatározásához, továbbá a péptartalom-pépigény viszonyának megállapítása érdekében, amely a betonszilárdság kielégítő becsléséhez szükséges.

Vizsgálataim ismertetése előtt a következő fejezetben összefoglalom a szemcsés halmazok tömörségére vonatkozó szakirodalmi adatokat.

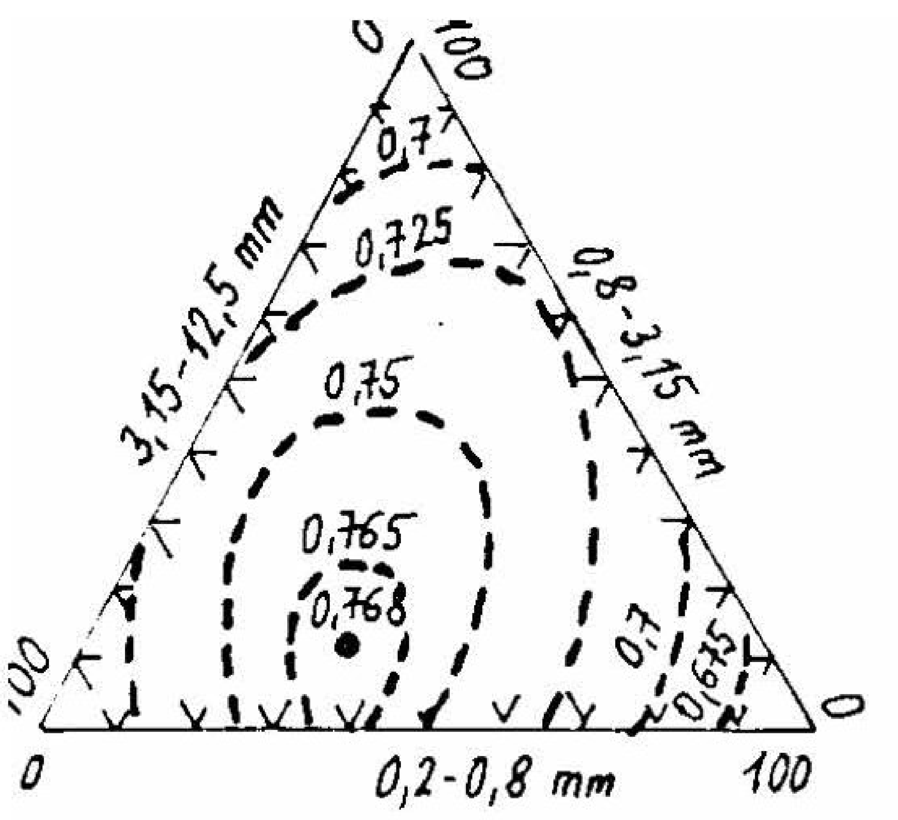
4.1. Irodalmi adatok a szemcsés halmazok tömörségéről



16. ábra



17. ábra



18. ábra

FERET még a múlt század végén mutatta ki [11], hogy a beton nyomószilárdsága összefügg az adalékanyag-váz tömörségével. Ez a megállapítás – bizonyos feltételek mellett – ma is érvényes, s majd egy évszázadra tekint vissza a legtömörebb adalékanyagváz kialakítására alkalmas szemcsehalmazok kutatása. E munkát FERET kezdte meg, aki adatait háromszögű koordináta rendszerben dolgozta fel. Jellegzetes eredményei közül látható egy a 16. ábrán, amely 50 liter térfogatú edénybe tömörítés nélkül elhelyezett homok-halmazok tömörségének a változását mutatja.

Tömörített halmazok vizsgálata során FULLER [40] a legtömörebb adalékanyag-vázhoz tartozó szemeloszlásra:

$$a = 100 \times \frac{d}{D} \quad \text{tömeg \%} \qquad (43)$$

összefüggést talált, ahol *a* = a *d mm* lyukbőségű szitán áthulló szemcsék tömeg %-a; *D* = a legnagyobb szemnagyság. A FULLER görbék a 17. ábra szerinti parabolák.

A FERET által kezdeményezett vizsgálatokat folytatva JOISEL [41] részletesen ellenőrizte a szemeloszlás hatását és kísérletei sok kérdésre választ adtak a folyamatos görbékkel jellemezhető adalékanyagok tömörségének a változására. JOISEL az adalékanyag frakciókat, majd az ezekből összeállított halmazokat fokozatosan növekvő mennyiségű vízzel keverte meg, meghatározott tömörítőmunkával bedolgozta és mérte a hézagtartalom változásait. Jellegzetes eredményei közül egyet a 18. ábrán lehet látni.

JQISEL eredményei FERET ábráihoz hasonlóak, a nagyobb tömörség részben a szemagyság növelésének, részben a tömörítésnek a következménye. JOISEL lényegesen homokdúsabb keverékeket javasol, mint amit a (43)-ból lehet számítani: *D = 12,5 mm* mellett például a *0,2 – 0,5 mm* szemcsékre FULLER *4,8 %*-ot, JOISEL *32 %*-ot talált megfelelőnek.

CAQUOT vezette be a referencia-beton fogalmát [42], amely lényegében a legtömörebb beton összetételének felel meg. Figyelembe véve az általa kísérleti úton megállapított falhatást is, a referencia-beton szemeloszlásának a számítására (cementtel együtt) az alábbi kifejezés alkalmas:

$$a = \frac{K}{\sqrt[5]{\frac{D}{d}}} \quad \text{tömegrész} \qquad (44)$$

ahol *K* = az adalékanyag fajtájától függőkísérleti állandó.

CAQUOT elméleti munkáját FAURY ültette át a gyakorlatba [43]. Vizsgálatai alapján a legkisebb levegőtartalmú beton adalékanyagát *D/2 – D* durva és d_o – *D/2* finom (cementtel együtt) frakciókból kell kialakítani. FAURY d_o értékét mint a cement legkisebb szemnagyságát értelmezi és *0,0065 mm*-ben határozza meg. Szerinte a beton akkor minimális cementtartalmú, ha a d_o – *D/2* frakció mennyisége:

$$a = \frac{100}{\sqrt[5]{D} - \sqrt[5]{d_o}} \times \left(\sqrt[5]{D} - \sqrt[5]{d_o}\right) \qquad (45)$$

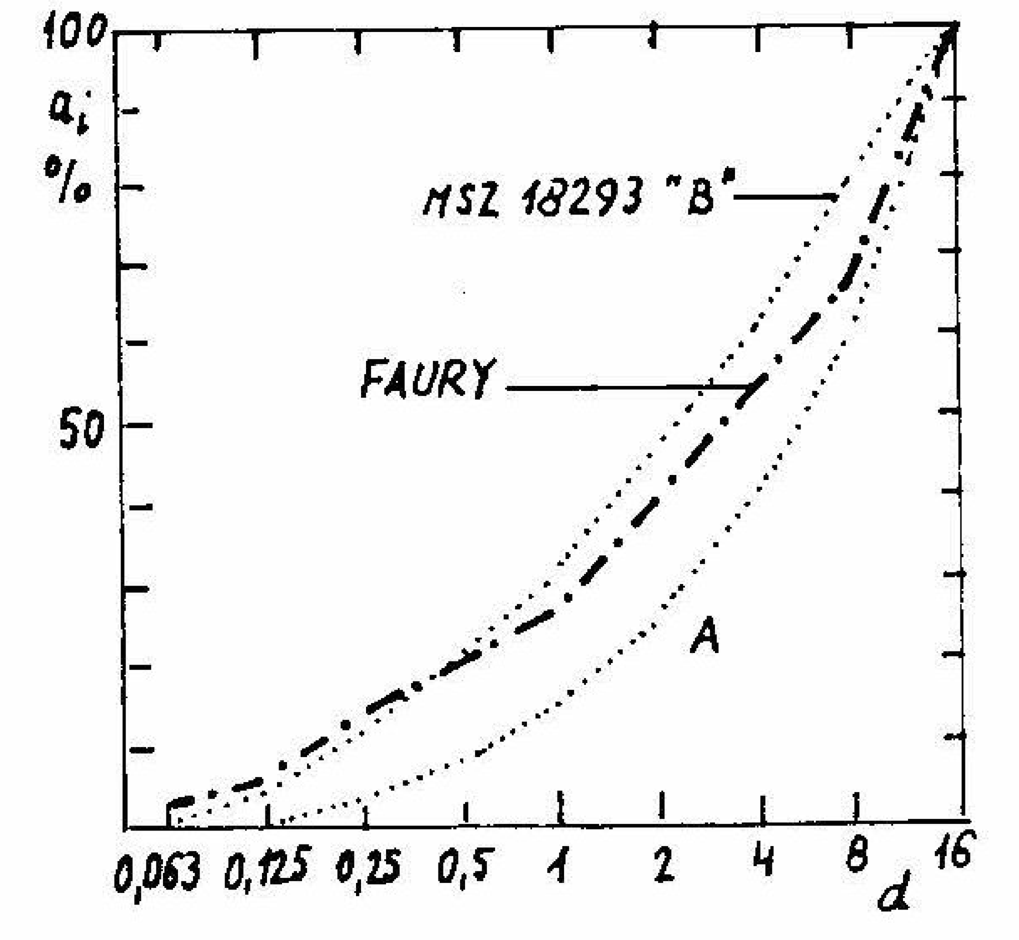
és mivel d_o = *0,0065 mm*, ezért $\sqrt[5]{d_o}$ = *0,365* , következésképpen:

$$a = \frac{100}{\sqrt[5]{D} - 0{,}365} \times \left(\sqrt[5]{d} - 0{,}365\right) \tag{46}$$

A *D – D/2 mm*-es frakciómennyisége FAURY szerint:

$$A = A + 17 \times \sqrt[5]{D} \tag{47}$$

ahol *A* = az adalékanyag fajtájától és a bedolgozás módjától függő állandó (értéke egység körüli).



19. ábra

Gömbölyű szemű homokos kavics és vibrátoros bedolgozás mellett a legtömörebb beton előállítására FAURY által ajánlott szemeloszlás, példaképpen, a 19. ábra szerinti (az ábrán feltüntettem az *MSZ 18293* határgörbéit is).

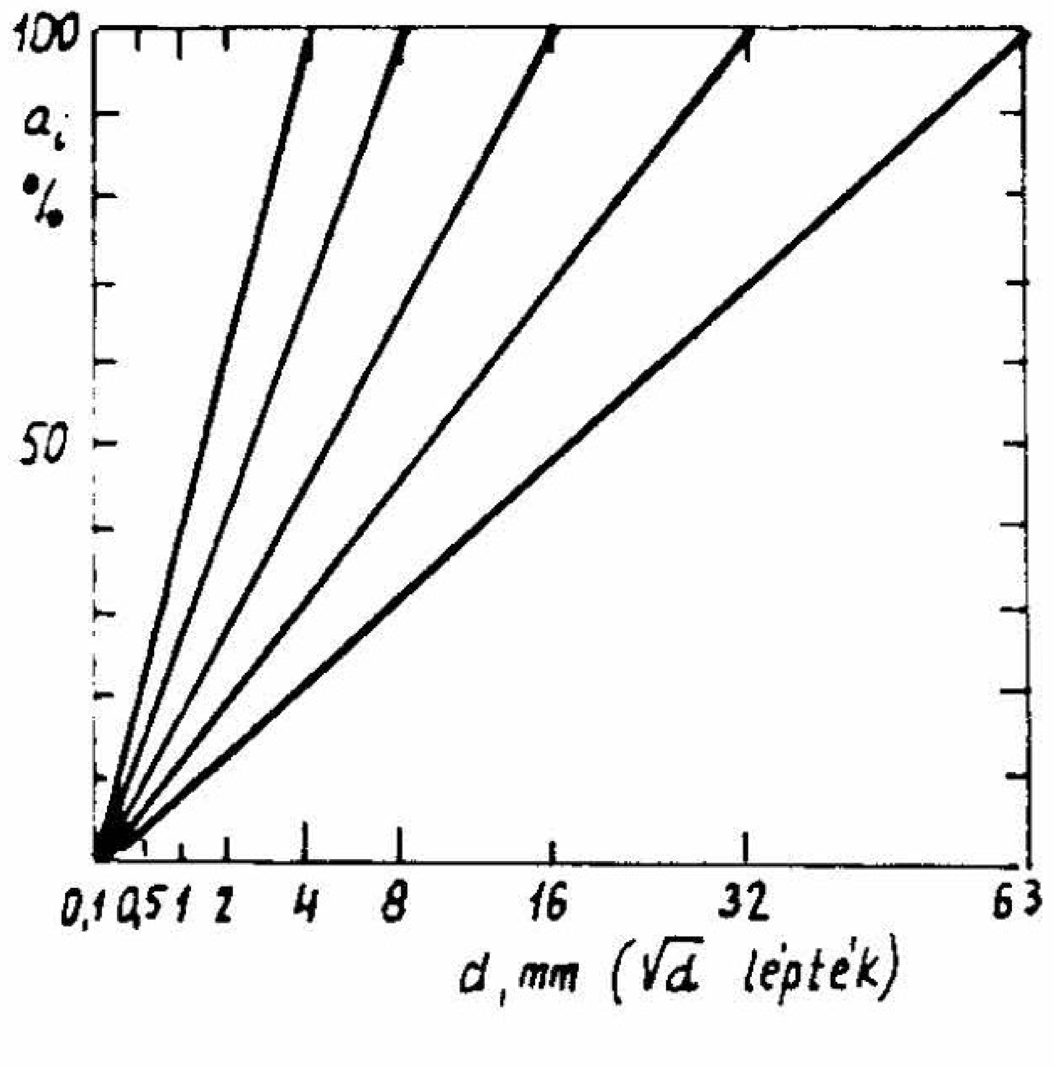
VALETTE [44] a legnagyobb tömörséget lépcsős szemeloszlással érte el, ahol a finom frakció legnagyobb szemcséi arányát *D/4* értékűre javasolta. Vizsgálatai szerint a nyomószilárdság ezzel a szemeloszlással a legnagyobb, ha a cementhabarcs-váz ugyancsak maximális tömörségű.

A [42] – [44] alatti vizsgálatok eredményei alapján dolgozták ki a francia gyakorlatban használt *L.C.P.C.* módszert [45], a legtömörebb adalékanyag-váz kísérleti meghatározását: először megállapítják az *5 – D mm* kavicsfrakció hézagtartalmát, majd minimális homoktartalmú cementhabarcs fokozatosan növekvő mennyiségű hozzákeverésével érik el a teljesen tömör betont.

A szemeloszlás jellemzésére ABRAMS vezette be a finomsági modulust [16], amely egyetlen számmal fejezi ki az adalékanyag minőségét. Valamennyi egyéb, később javasolt jellemző (bizonyos megkötések mellett) közvetlenül átszámítható az ABRAMS-féle finomsági modulusra (HUMMEL-terület, ROTHFUCHS-féle áthullási összeg, SPINDEL-féle dekadikus finomsági modulus stb.). Dolgozatom további rézében a finomsági modulust akkor jelölöm *m*-mel, ha az az *ISO* szabvány szerinti *„A"* szitasorozaton van értelmezve (*MSZ 4713*), *0,063 mm* szemnagyságtól kezdve. Erre a finomsági modulusra – esetenként – az egyéb modulusokat PALOTÁS szerint [46] számítom át.

Az utóbbi évtizedekben többen is vizsgálták, hogy a tökéletesen tömör beton előállításához, adott finomsági modulusú adalékanyagot felhasználva, mennyi a szükséges cementpép-mennyiség minimuma. Ez az ún. *cementpép-igény* (V_{po} , *liter/m*^{3}). ROTHFUCHS [47] azt találta, hogy a cementpép-igény az ún. *ideális szemeloszlású* adalékanyagot (lásd 20. ábra) alkalmazva a legkisebb, és a következő értékeket éri el:

Szemnagyság, mm	0-3	0-7	0-15	0-30	0-70
V_{po} homokos kavicsra liter/m^3	280	250	220	200	180
zúzottkőre, liter/m^3	310	280	260	230	210



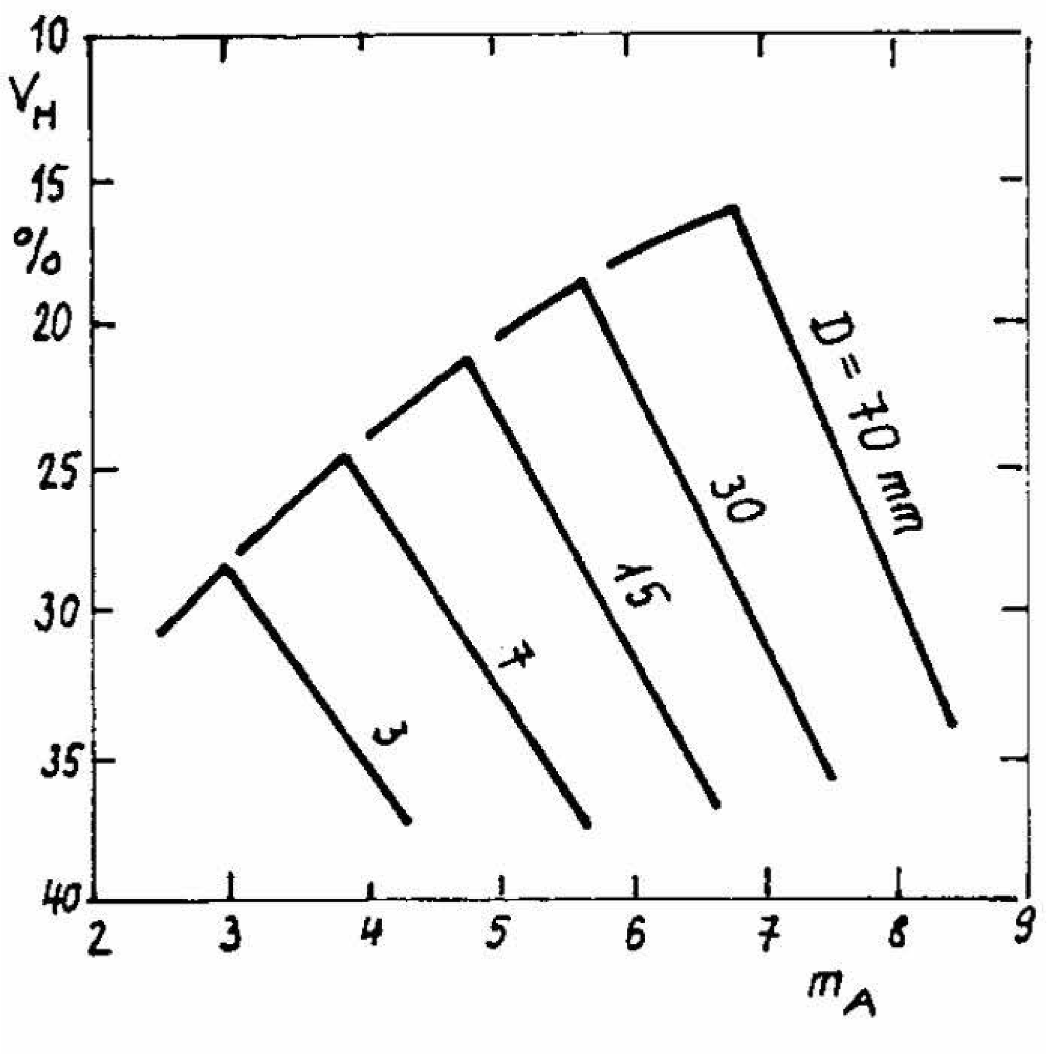
20. ábra

Az *ideális szemeloszlású* adalékanyag $d^{0,5}$ léptékű grafikonon ábrázolva a 20. ábra szerinti egyenessel jellemezhető. Minden más szemeloszlásra a pépigény – ROTHFUCHS szerint – nagyobb. Hazánkban – többek között – WEISS vizsgálta az adalékanyag hézagtartalmát a cementpép szükséglet, ill. WEISS szerint az ezzel egyenértékű vízigény megállapítására. [48]. Kísérletei szerint a hézagtartalom (pépigény) az ABRAMS-féle finomsági modulustól függően a 21. ábrának megfelelően változik.

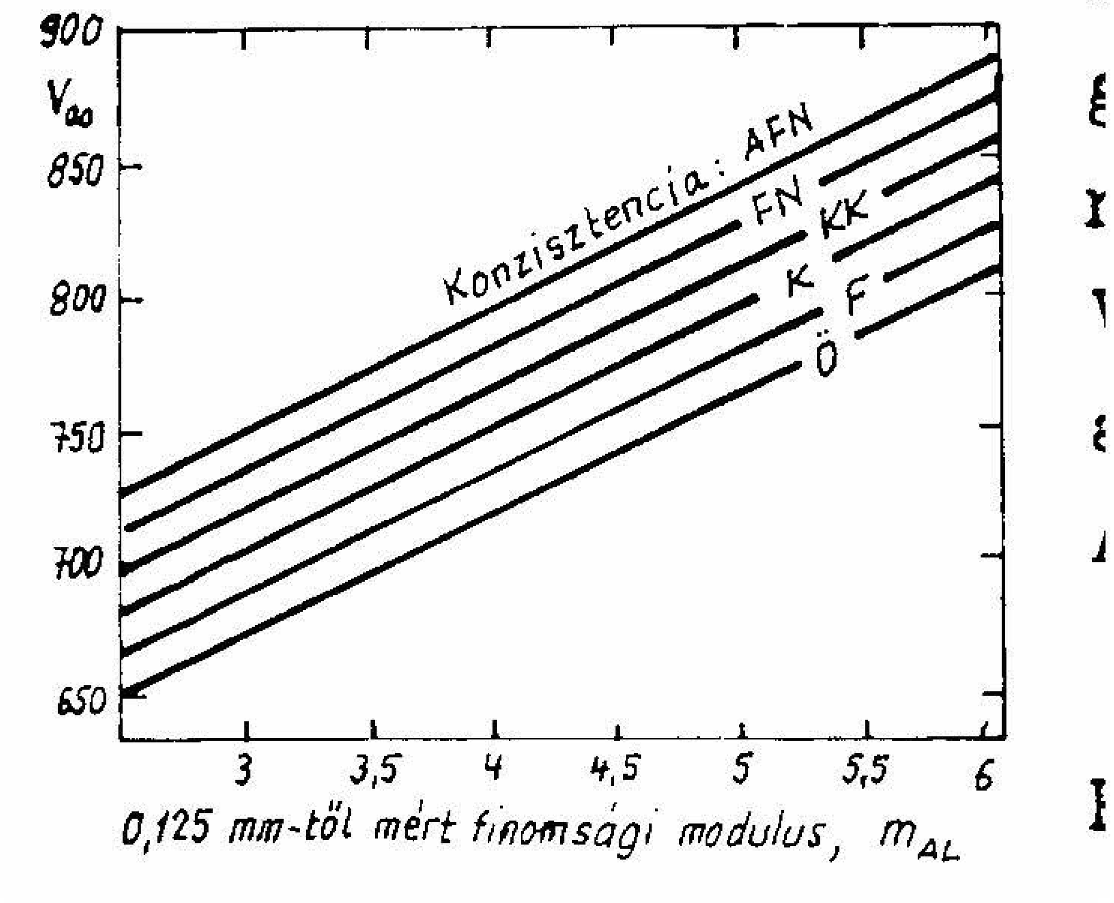
ALEXANDERSON [49] vizsgálatainak megfelelően V_{ao} értéke a konzisztenciától, ill. az ehhez szükséges vízadagolástól függ. Ha növekszik a finomsági modulus és csökken a beton képlékenysége, akkor növekszik a betömöríthető adalékanyag-térfogat (és ezzel együtt csökken a pépigény) a 22. ábrának megfelelően. Számításaim szerint V_{ao} térfogatra az alábbi függvények illeszthetők:

AFN betona $$V_{ao} = 567 + 46 \times m_{AL} \quad liter/m^3 \tag{48}$$

F betonra $$V_{ao} = 500 + 44 \times m_{AL} \quad liter/m^3 \tag{49}$$

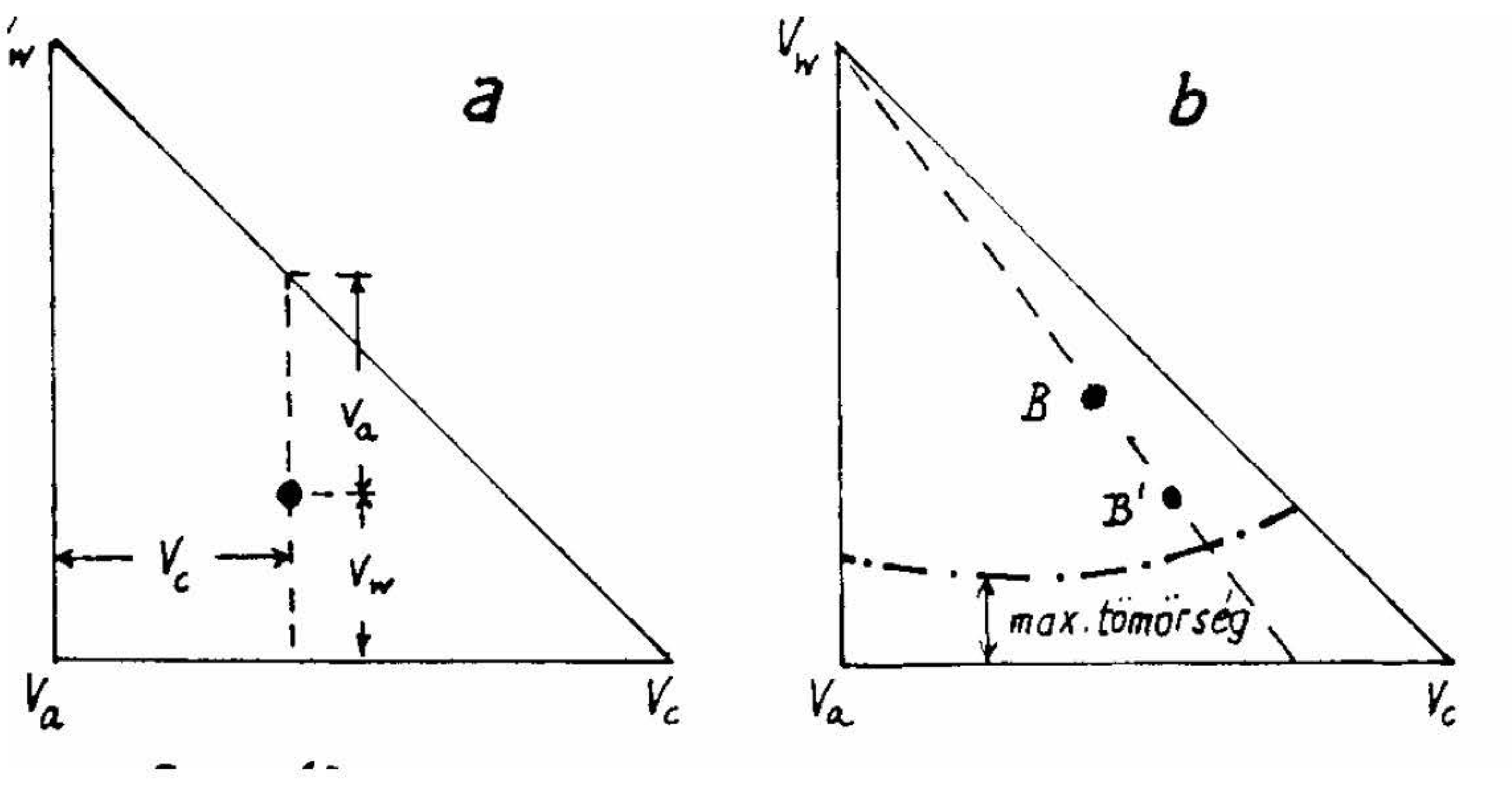


21. ábra

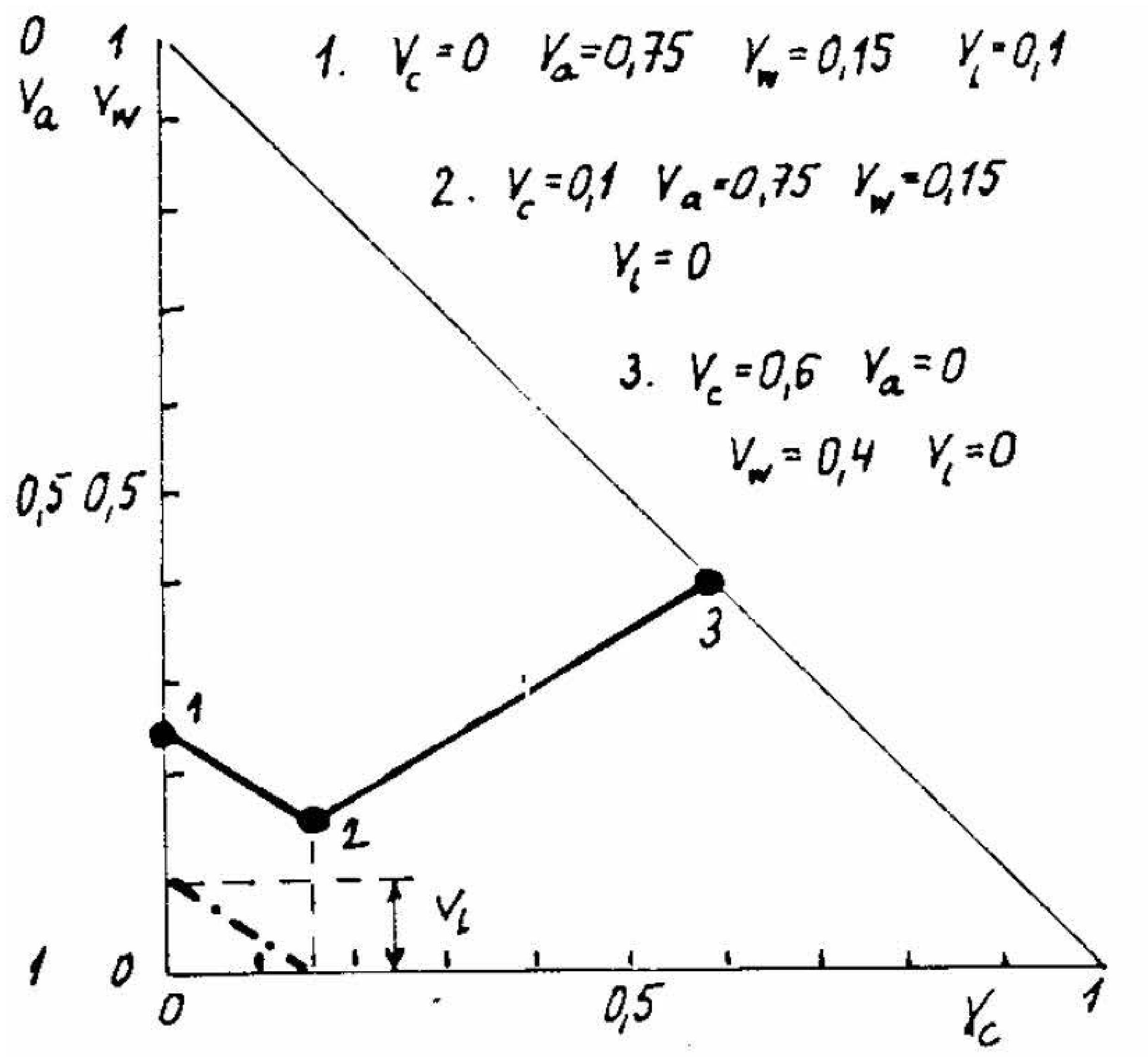


22. ábra

LEVIANT a beton összetételét derékszögű háromszög koordináta rendszerben ábrázolta [50}, ahol az alkotóanyagok térfogatának arányait az élekre mérte fel. Ebben a háromszögben bármely pont távolsága a határegyenesektől megadja a *cement : víz : adalékanyag* (V_c : V_w : V_a) térfogat arányokat (23/a ábra). Könnyen belátható, hogy adott V_c : V_a arányú, bármely víztartalmú keverék jellemző pontja a V_w csúcspontból húzott egyenesen fekszik: minél mélyebben van a jellemző pont, annál erőteljesebb a tömörítés. Van azonban egy olyan alsó határ, amelynél nem lehet a betont jobban tömöríteni. Az ezekből a pontokból LEVIANT által képzett határgörbe látható a 23/b ábrán.

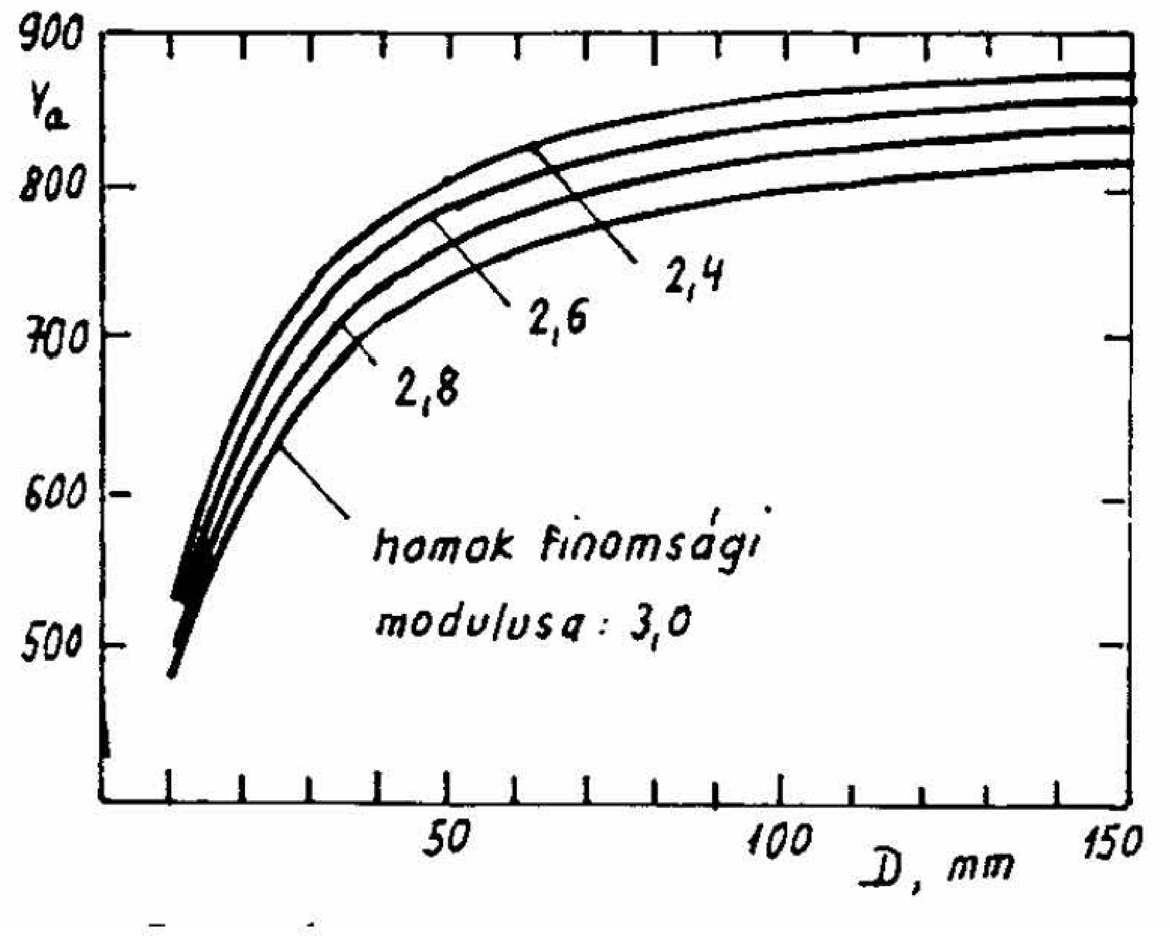


23. ábra



24. ábra

A határgörbe jobb oldali vége a tiszta cementpép, bal oldali vége az adalékanyag-víz keverék adott tömörítés melletti tömörségére jellemző. Ez az ábrázolás végeredményben a bedolgozható adalékanyag-térfogat maximális V_{ao} értékének a meghatározására alkalmas. LEVIANT azonban csak elvi megoldást ismertet, vizsgálati adatokat nem közöl. Az ábrázolási mód szemléletes, de az [50] alatti tanulmányban közölt módon nem szabatos: a V_a – V_c egyenes és a jellemző pont közötti ordináta ugyanis nemcsak a vizet, hanem a levegőt is tartalmazza kis cementpép tartalmú betonokra és csak a legnagyobb tömörség jellemző pontjában lehet elérni a levegőmentességet. Ezt szerkesztettem meg a 24. ábrán.



25. ábra

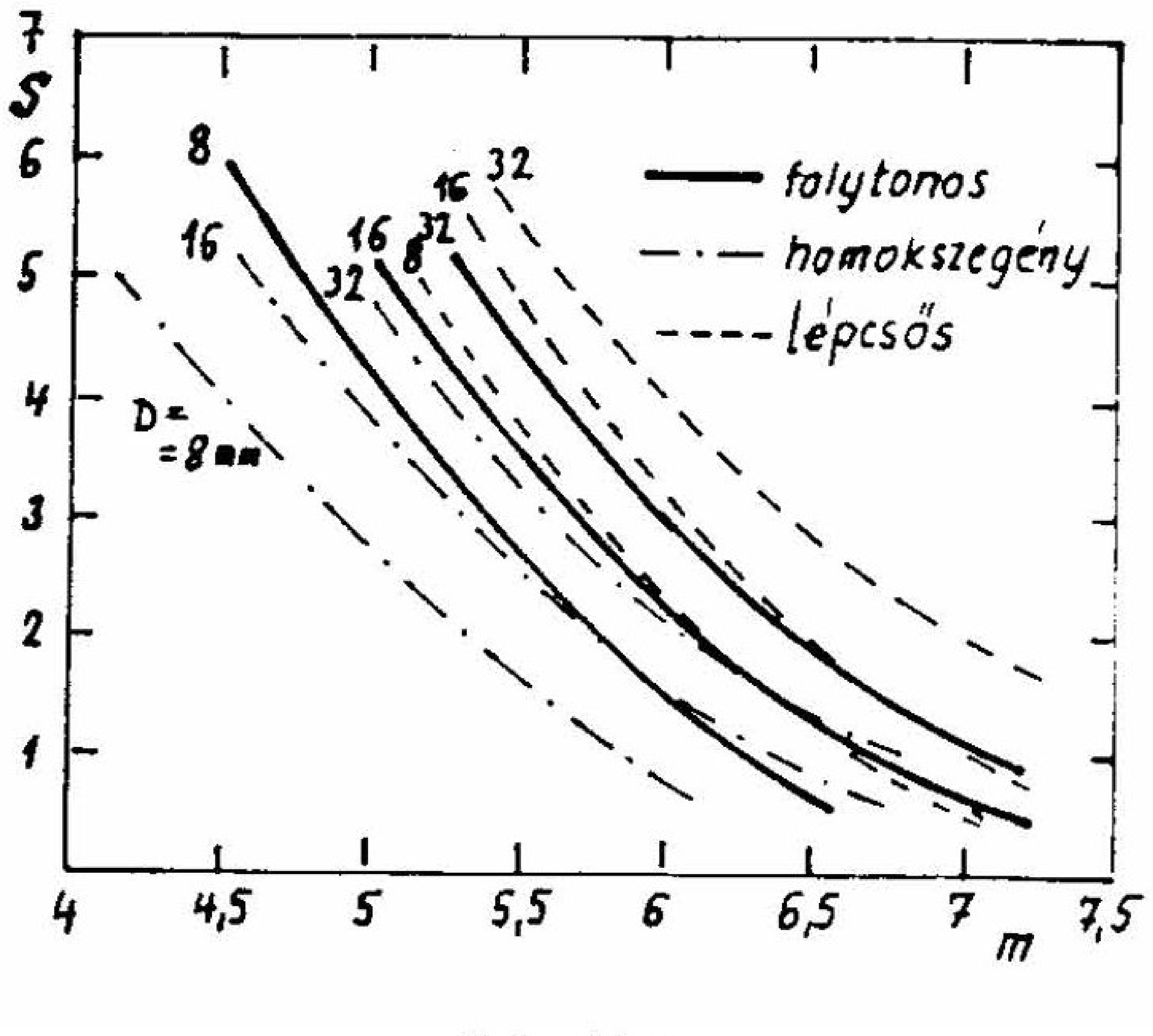
A szemcsék péppel bevonandó felületének a vizsgálatára használják azt a módszert is, hogy adott tömegű adalékanyaghoz fölös mennyiségű vizet kevernek, majd 0,063 mm-es szitán a vizet lecsepegtetik. Az adalékanyag tömegnövekedése a szemcsék felületére tapadt víz mennyiségét adja meg. Ez a vizsgálati eljárás azonban nem a pépigényre (hézagtartalom), hanem a vízigényre lehet közelítés.

NEVILLE az adalékanyag bedolgozható térfogatát a homokrész finomsági modulusától függően táblázatban adta meg. Adataiból [51] szerkesztettem meg a 25. ábrát, amely képlékeny betonokra jellemző. Földnedves betonokra az értékek NEVILLE szerint10 %-kal növelhetők, folyós betonokra 10 %-kal csökkenthetők.

ZOLLINGER [52] szerint a finom adalékanyag szemcsék bevonásához nem kell cement, ezért gyakorlatilag megfelelő, ha a 0-7 mm szemcsékre 10 %, 7-D mm szemcsékre 20 % pép-többlettel számolunk az adalékanyag halmaz alábbi módon megállapított V_{la} levegőtartalmához képest:

$$V_{la} = 1000 - \left(1 - \frac{\gamma_{ah}}{\rho_a}\right) \quad liter/m^3 \qquad (50)$$

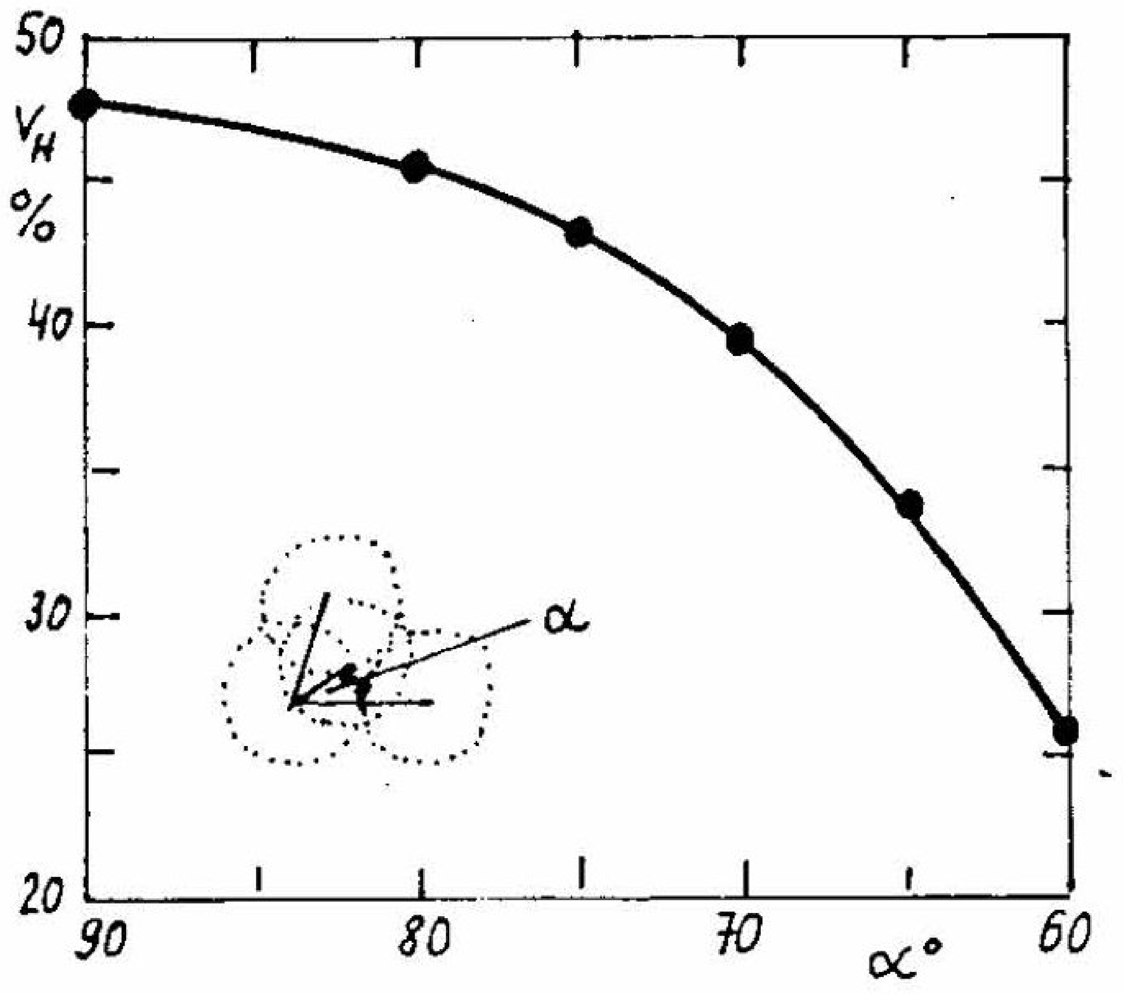
Ezt a számítást azonban csak első közelítésnek tekinthetjük, mert a száraz adalékanyag-halmaz tömörsége eltér a nedves halmazétól.



26. ábra

Amint a bemutatott néhány irodalmi adatból látható, az adalékanyagok tömörségét, ill. pépigényét különböző vizsgálatokkal határozták meg, és különböző eredményeket kaptak. A pépigény egyrészt az adalékanyag fajlagos felületétől, másrészt hézagtartalmától függ, a hézagtartalom azonban nem független a szemcsefelületeket bevonó vízfilm vastagságától. Ezért azok a vizsgálatok, amelyek a száraz adalékanyag-halmaz tömörségét állapítják meg, a pépigény szempontjából csak közelítést jelenthetnek.

A szemcsék fajlagos felülete számíthatö, ha alakjukat gömbnek tételezzük fel. PALOTÁS [53] adataiból néhány szemeloszlásra a 26. ábra szerinti összefüggéseket lehet nyerni. Az ábra szerint a finomsági modulus növekedésével a fajlagos felület csökken, de értéke egyúttal függ a legnagyobb szemnagyságtól és a szemeloszlási görbe alakjától is. Legkisebb fajlagos felületű az egyszemcsés halmaz.



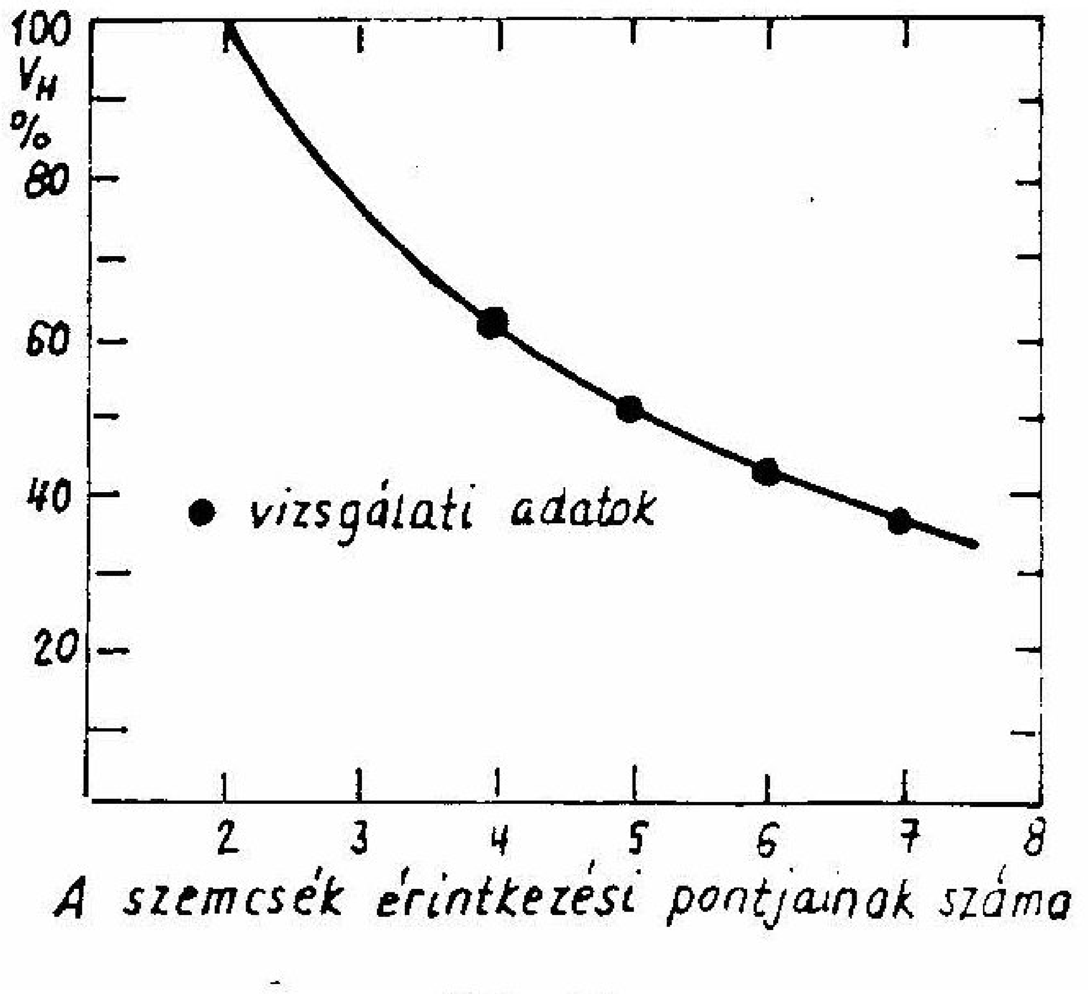
27. ábra

Az adalékanyag hézagtartalmának a számítása a fajlagos felületnél nehezebb. KÉZDI [54] ismerteti SLICHTER eljárását a különböző elhelyezkedésű, azonos méretű, gömbalakú szemcsékből álló halmazok hézagtartalmának a meghatározására. A hézagtérfogat a gömbszemcsék középpontjait összekötő egyenesek α hajlásszögétől függ a

$$V_H = 1000 \times \left(1 - \frac{\pi}{6 \times (1 - \cos\alpha) \times (1 + \cos\alpha)}\right) \text{ térfogat\%} \qquad (51)$$

kifejezés szerint. Ebből az összefüggésből szerkeszthető meg a 27. ábra. Megjegyzendő, hogy a hézagtartalom független a szemcsemérettől, de nagymértékben függ a szemcsealaktól és a felületek érdességétől, továbbá az (51) összefüggés csak $60^\circ - 90^\circ$ hajlásszögek között ad reális eredményt.

A szemcsés halmazok hézagtérfogatának geometriai interpretálására újabban is ismételten visszatértek. KARNAUKOV [55] a hézagtérfogatot az azonos átmérőjű gömbök érintkezési pontjainak a számától függően határozta meg, és számításait acélgolyókból kialakított halmazokon ellenőrizte. Ha az érintkezési pontok száma 4-7 között változott, akkor a számított értékek a mért adatokkal jól megegyeztek. Ez látható a 28. ábrán.

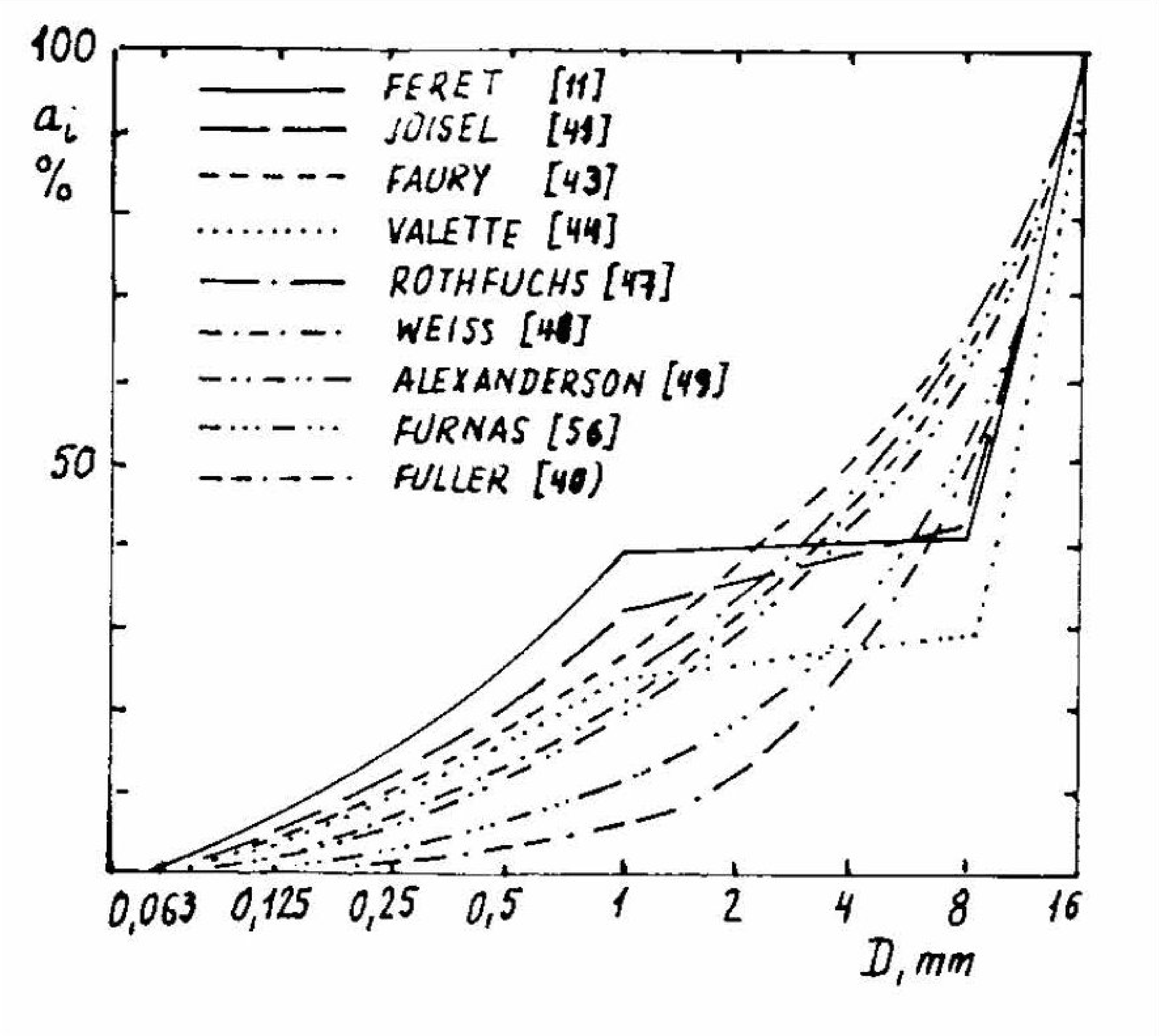


28. ábra

Ha a halmaz különböző szemnagyságú szemcsék keveréke, akkor nagyon nehéz a várható tömörséget akár még gömbalakú szemcsék feltételezésével is kiszámítani. FURNAS [56] kísérelte meg, hogy matematikai összefüggést állapítson meg a szemcsés halmazok jellemzői (szemnagyság, szemeloszlás) és a tömörség között. Vizsgálatai szerint a szemcsés anyag minden frakciójára létezik egy adott, állandó arány az egymást követő szemcseméretű anyagok mennyiségei között, amely mellett a halmaz legnagyobb tömörsége elérhető. Ezt az arányt kiszámítva a FULLER-parabolákhoz hasonló szemeloszlási görbéket kapott. A vázlatosan ismertetett irodalmi adatokból kiszámítottam, hogy a legnagyobb tömörségű, azaz a legkisebb pépigényű szemeloszlás *D = 16 mm* mellett ho-

gyan alakul. Az eredmények az alábbiakban láthatók {az *U egyenlőtlenségi együttható* számítása az (57) – (59) egyenletek szerint}:

FERET [11]	39	2	59	5,91	69,4
JOISEL [41]	32	11	57	6,12	56
FAURY [43]	29	41	30	5,69	32
VALETTE [44]	25	5	70	6,38	43,6
ROTHFUCHS [47]	25	46	29	5,14	28,5
WEISS [48]	23	45	32	5,82	39,6
ALEXANDERSON [49]	21	40	39	6,23	24,8
FURNAS [56]	11	42	47	6,74	12,2
FULLER [40]	6	44	50	6,95	6,6



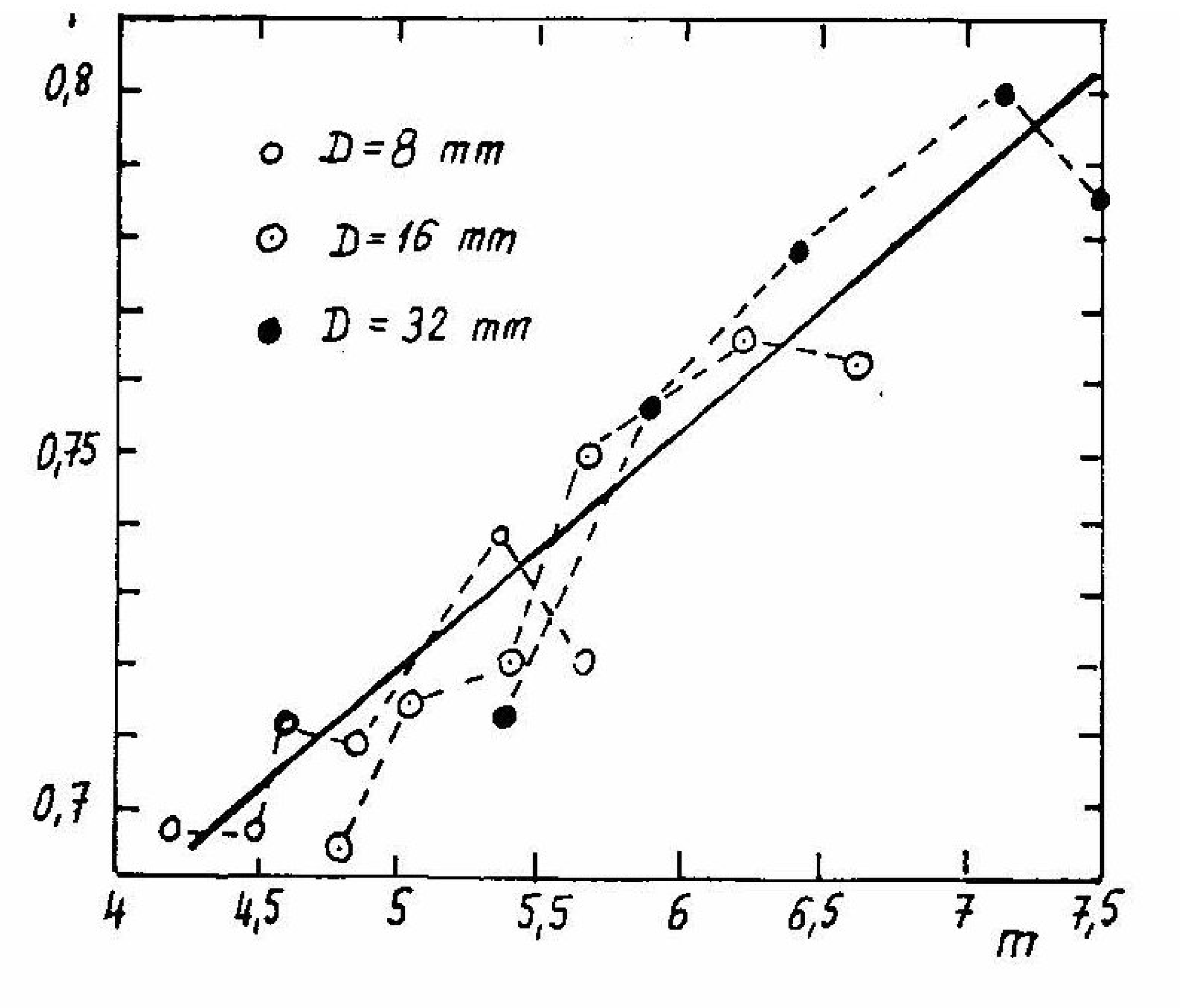
29. ábra

A fenti szemeloszlási görbéket a 29. ábra mutatja be. Az adatok és az ábra arra hívják fel a figyelmet, hogy az adalékanyag tömörségének a megállapítására végzett vizsgálatok, ill. a kialakított számítási eljárások nem adnak a gyakorlat számára egyértelműen használható eredményeket. Ezért volt szükséges vizsgálatokkal tisztázni az eltérések okait és megkísérelni a vizsgálati adatokra illeszkedő becslési eljárás kidolgozását.

4.2. Kísérletek az adalékanyagok tömörségének, ill. pépigényének a megállapítására

A szemcsés halmazok tömörségének a vizsgálatára többféle módszer alakult ki:

a) száraz adalékanyag halmaz tömörítés nélkül [11], vagy tömörítve [41] – [44],
b) nedves adalékanyag halmaz tömörítve [45] – [48],
c) fokozatosan nedvesített adalékanyag-halmazok tömörítve [41],
d) kis cementtartalmú betonkeverékek tömörítve [49] – [51].



30. ábra

Az adalékanyagok tömörségét, ill. pépigényét első ízben 1976 évben vizsgáltam meg az új betonkészítési műszaki irányelveket megalapozó kísérletek során [57] – [58], a d) alatti módszerrel. Az *MSZ 18293* szerinti *A, A-B, B, B-C* és *C* szemeloszlású, *D = 8, 16* és *32 mm*-es homokos kaviccsal m_c = *125 kg/m*^{3} cementtartalmú betonkeverékeket készítettem (k_{CF} = *0,85-0,92;* k_s = *1-5 s)* és 20 cm élhosszúságú kockaformába, ill. ∅15×30 cm-es hengerformába laboratóriumi asztalvibrátoron dolgoztam be (ÉPGÉP RZ-4) a konzisztenciához illesztett tömörítési idővel. Mértem a bedolgozott friss beton testsűrűségét, az adalékanyag tömör térfogatát a (2)-ből számítottam. A vizsgálati eredményeket a 30.ábra foglalja össze.

Adataim illeszkednek a [49] tanulmány eredményeihez (vö. 22. ábra). A finomsági modulus és a tömörség, ill. a bedolgozható adalékanyag-érfogat összefüggése a következő:

$$T = 0{,}034 \times m + 0{,}55 \quad \text{térfogatrész} \qquad (52)$$

$$V_{ao} = 34 \times m + 548 \quad \text{liter/m}^3 \qquad (53)$$

és ez ugyancsak összevethető a (48)–(49) függvényekkel. Megjegyzendő, hogy a 22. ábrán megadott m_{AL} értéke 0,125 mm-től értendő, ezért $m = m_{AL} + 1$. A 22. ábra és a 30. ábra adatai között képlékeny konzisztenciára $m = 7$ mellett nincs eltérés, $m = 4$ mellett a 22. ábra 5 %-kal kisebb V_{ao} értéket ad, mint a 30. ábra.

A 30. ábrán a vizsgálati adatokat is feltüntettem, s ez arra hívta fel a figyelmemet, hogy a kiegyenlítő egyenes csak első közelítésnek tekinthető, mivel a különböző legnagyobb szemnagyságú adalékanyag keverékek vizsgálati pontjait összekötve nagyobb finomsági modulusok mellett határozott törés tapasztalható, ami emlékeztet WEISS [48] 21. ábrán bemutatott eredményeire.

A betonkészítés műszaki irányelveinek korszerűsítésére adott ÉVM megbízás keretében folytattuk az adalékanyagváz tömörségét befolyásoló tényezők vizsgálatát 59] – [60], többféle szemelosz-

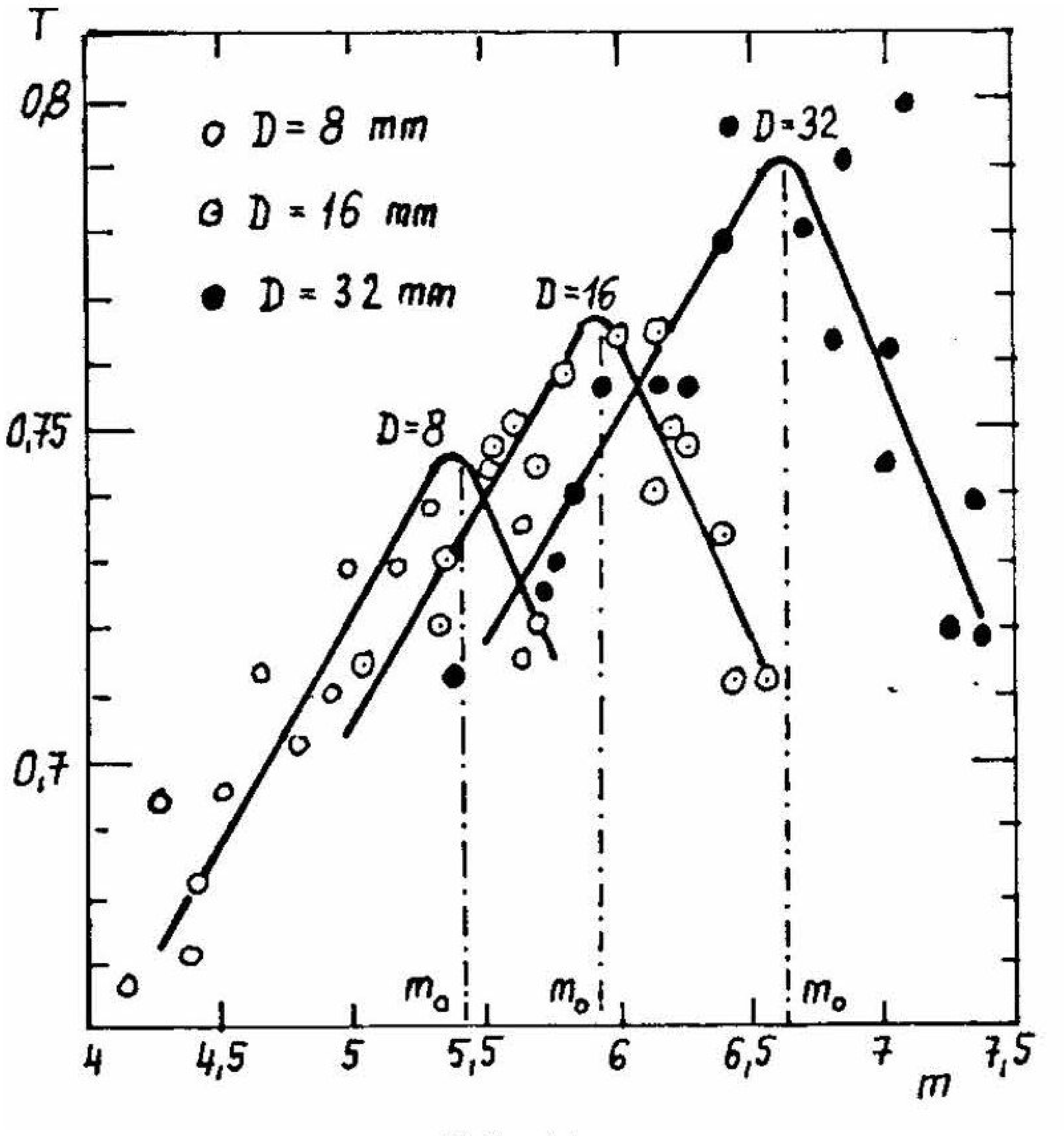
lást alkalmazva (betonösszetétel, konzisztencia, próbatest alakja és mérete, valamint a tömörítés a 30. ábrának megfelelő volt). Azt állapíthattuk meg a kísérleti eredményekből szerkesztett 31. ábra alapján, hogy adott legnagyobb szemnagyság mellett, képlékeny konzisztenciára van olyan m_o finomsági modulus, amelynél az $m - T$ összefüggésnek töréspontja van:

$$m_o = 5,11 + 0,048 \times D \tag{54}$$

és ezért a sűrűség:

$m > m_o$ mellett:
$$T = 1 - \frac{100 \times m - 250 + 6,6 \times D}{1000} \tag{55}$$

$m < m_o$ mellett:
$$T = 1 - \frac{603 + 1,5 \times D - 67 \times m}{1000} \tag{56}$$



31. ábra

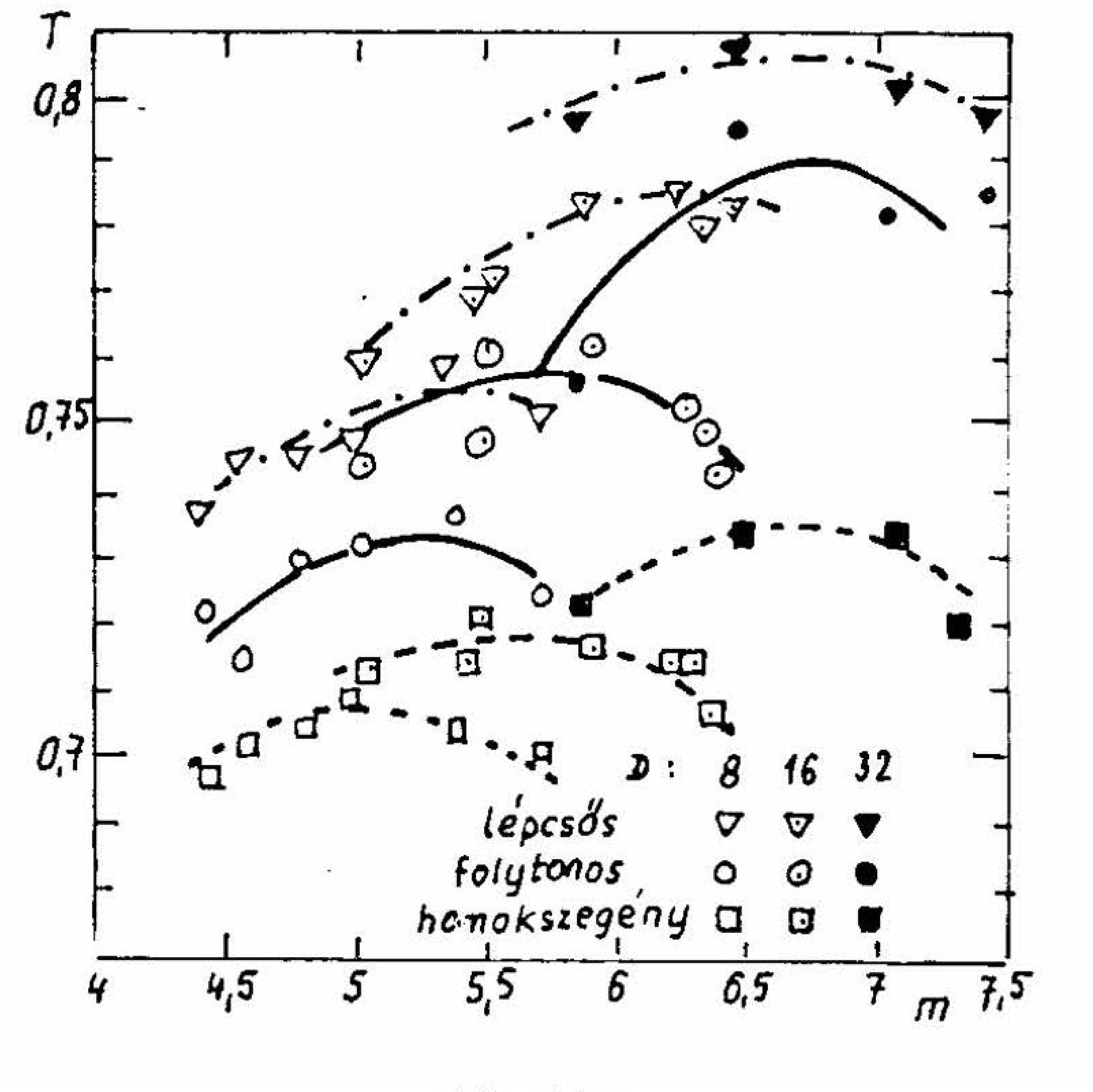
A töréspont azzal magyarázható, hogy adott D mellett növelve a finomsági modulust, az adalékanyag egyre homokszegényebbé válik s így kis cementtartalom (m_c = 125 kg/m^3) mellett a képlékeny betonkeverék víztartó képessége fokozatosan romlik [38]. Emiatt a vibrálást előbb be kell fejezni, mintsem a halmaz teljes tömörségét el lehetne érni.

Meg kell jegyezni, hogy a 31. ábra szerinti törésponthoz tartozó m_o érték igen közel van a PALOTÁS-féle optimális finomsági modulus [61] m_o = 125 kg/m^3 cementtartalomra meghatározott értékhez. A PALOTÁS-féle optimális finomsági modulus ugyanis:

$$m_o = 2,66 \times lgD + 2,2 + 0,0028 \times m_o \tag{57}$$

ebből D = 16 mm, ill. D = 32 mm mellett rendre m_o = 5,75 és 6,55 , míg az (54)-ből m_o = 5,88 és 6,65 számítható.

A 30.–31. ábrákon folytonos, ill. közel folytonos szemeloszlású adalékanyagokkal végzett vizsgálataim eredményeit közöltem. Változatlan finomsági modulus és legnagyobb szemnagyság mellett azonban többféle szemeloszlási görbe alakítható ki, ahogyan ezt a 10. ábra mutatta. Ezeknek az eltérő szemeloszlású adalékanyagoknak vizsgálati eredményeit a 32. ábrán dolgoztam fel (összetétel, konzisztencia és mérési módszer a 30. ábra szerinti).



32. ábra

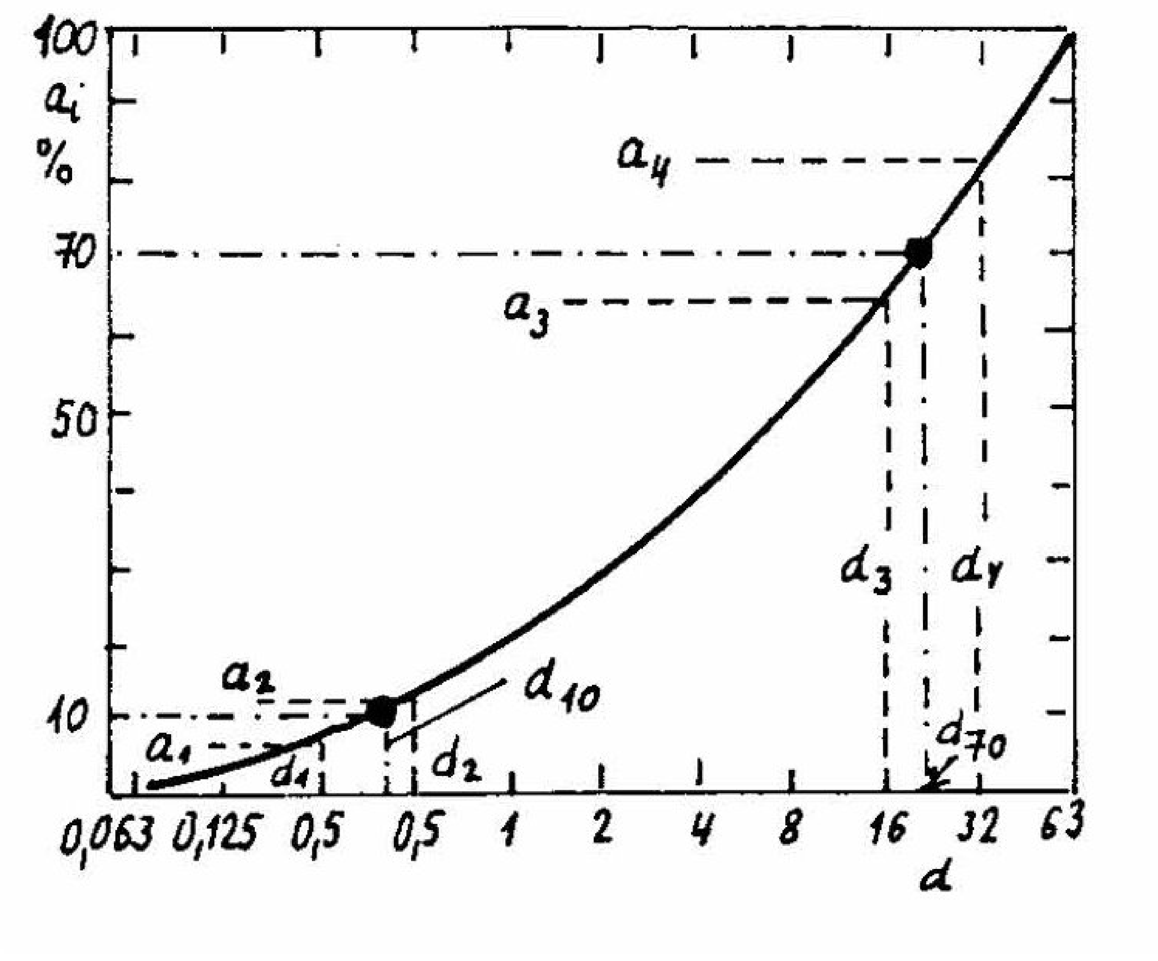
A szemeloszlási göbe alakját az egyenlőtlenségi együtthatóval lehet jellemezni. A talajmechanika a szemcsés anyagok tömöríthetőségét graduáltságuk alapján osztályozza [62] és a graduáltságot az U egyenlőtlenségi együtthatóval fejezi ki, amely a 60 % és a 10 % áthulláshoz tartozó szemnagyságok hányadosa. A lépcsős szemeloszlású, nagy szemnagyságú, homokdúsabb adalékanyagok lépcsőzetessége azonban 60 % áthullás felett is kialakulhat, ezért a beton adalékanyagának egyenlőtlenségi együtthatóját célszerű

$$U = \frac{d_{70}}{d_{10}} \tag{58}$$

hányadosból képezni, ahol d_{70} és d_{10} rendre a 70 % és a 10 % áthulláshoz tartozó szemnagyság (mm). Számítása a 33. ábra jelöléseinek megfelelően:

$$y_{70} = \frac{\lg d_4 - \lg d_3}{a_4 - a_3} \times (70 - a_3) + \lg d_3 \quad \text{és} \quad d_{70} = 10^{y_{70}} \tag{59}$$

$$y_{10} = \frac{\lg d_2 - \lg d_1}{a_2 - a_1} \times (10 - a_1) + \lg d_1 \quad \text{és} \quad d_{10} = 10^{y_{10}} \tag{60}$$



33. ábra

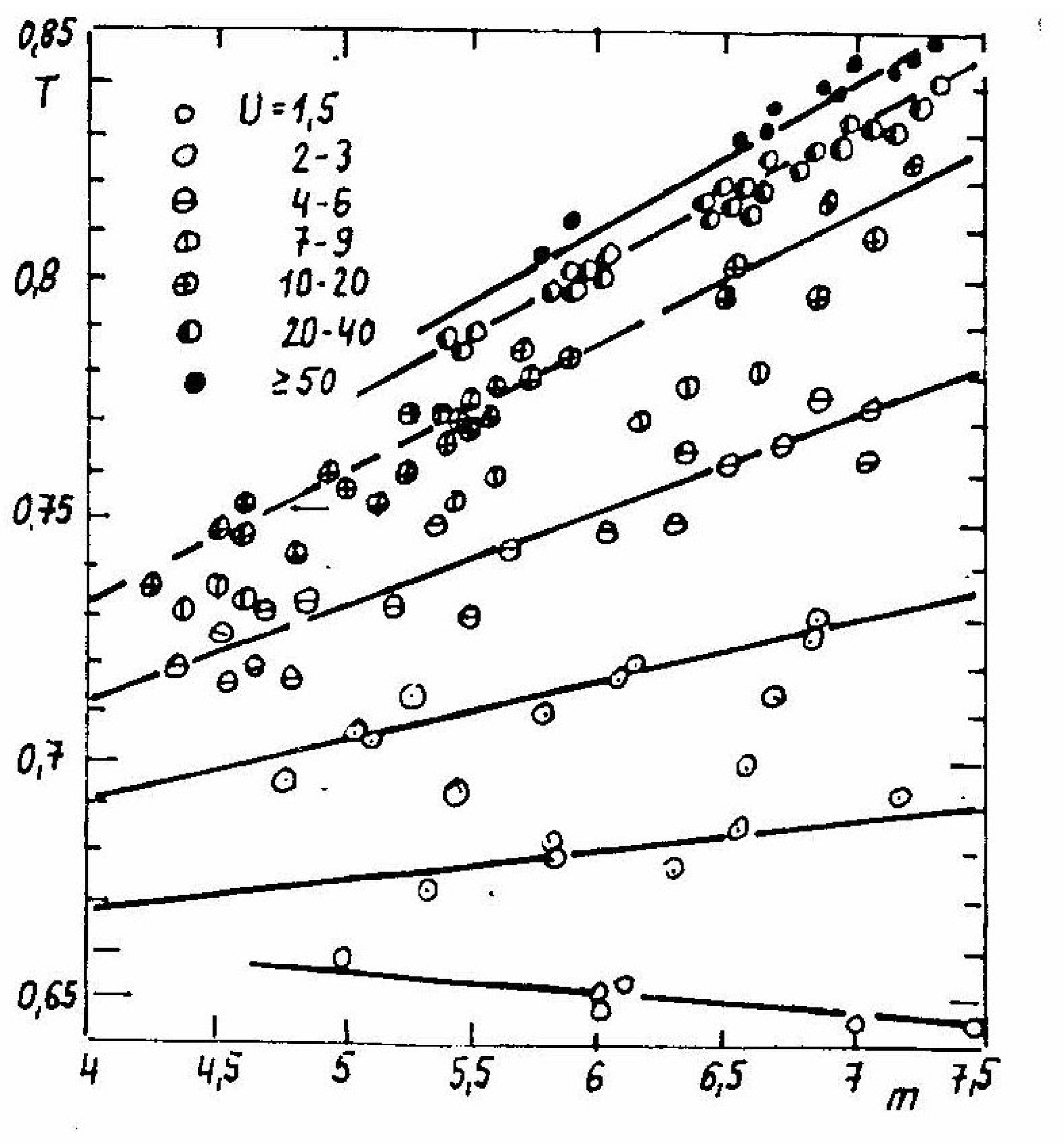
Vizsgálataim eredményei alapján azt találtam, hogy az m – T – U összefüggése kis cementtartalmú, homokos kavicscsal készített képlékeny betonkeverékekre hullámfüggvénnyel közelíthető az alábbiak szerint (tömegrészben):

$$T = 0{,}65 + \left[\lg(U - 0{,}5) \times \frac{64}{16 + (m - 7)^2} \times 0.022 \right] \tag{61}$$

Magyarázatként megjegyzem, hogy közel gömbalakú, egyszemcsés adalékanyagokra *T = 0,65* (ezért van a képletben 0,65 állandó) és *U = 1,5* {ezért van a képletben lg(U-0,5) szorzótényező}.

A beton adalékanyagának a tömörsége a konzisztenciától is függ. Míg a megfelelő víztartóképességű adalékanyagokból készített kis cementtartalmú képlékeny keverékek hiánytalan tömörítésére a laboratóriumi asztalvibrátor általában megfelel, addig *AFN* vagy *FN* keverékeket a szokványos eszközökkel nem lehet levegőmentesen bedolgozni. A Mélyépítő Vállalat budapesti Cserhalom utcai laboratóriumában *Máhr Géza* vezette be a HILTI-kalapácsra szerelt tömörítőfej alkalmazását. Ez az eszköz az *AFN-FN* keverékeket is képes megfelelően tömöríteni.

A k_s = *40 s* víztartóképességű, $m_c \leq 125$ *kg/m*^{3} cementtatalmú, *AFN* keverékekre végzett vizsgálataim eredményeit (tömörítés HILTI-kalapáccsal) a 34. ábrán dolgoztam fel. Az ábra szerint a tömörség lineárisan változik a finomsági modulustól, és exponenciálisan változik az egyenlőtlenségi együtthatótól függően. Az eredményekre jól illeszkedik /62) alatti függvény. A 34. ábrán folytonos vonallal jelölve az ebből a függvényből számított egyenesek láthatók.



34. ábra

$$T = \left(0{,}66 - 0{,}05 \times \lg\frac{m}{4} \right) + 0{,}038 \times e^{-\frac{2}{U-0{,}5}} \times \left(m - 1{,}54 \times e^{\frac{1}{U-0{,}5}} \right) \quad \textit{tömegrész} \tag{62}$$

4.3. Az eredmények értékelése, megállapítások

A tömörséget bármilyen szemeloszlású és víztartalmú adalékanyaggal meg lehet vizsgálni. Az *AFN* keverékek tömörsége a finomsági modulus növekedésével lineárisan, az egyenlőtlenségi együttható növekedésével exponenciálisan nő a 34. ábrának megfelelően. A kis cementtartalmú képlékenyönthető keverékek vizsgálatakor azonban az adalékanyag tömörségének a változása a finomsági modulus változásával nincs lineáris kapcsolatban, hanem hullámfüggvénynek megfelelően, ahogyan azt a (61) függvény fejezi ki. Ennek az az oka, hogy a kis homoktartalmú képlékeny szemcsehalmaz gyakorlatilag elérhető tömörsége kisebb, mint az elméletileg elérhető; a csekély víztartó képesség miatt ugyanis a betont nem lehet az elméleti tömörség eléréséig tömöríteni, mert a vízleadás korábban megkezdődik és emiatt a tömörítést abba kell hagyni, különben a keverék szétosztályozódna.

Az adalékanyag tömörsége kifejezi a szemcsés halmaz által az adott feltételek (víztartalom, konzisztencia, tömörítés) mellett elfoglalt teret. Például *T = 0,75* azt jelenti, hogy *1 m*^{3} térbe *0,75 m*^{3} tömör adalékanyag dolgozható be adott körülmények között, következésképpen *0,25 m*^{3} teret kell, ill.

lehet péppel kitölteni, ha $V_l = 0$ levegőtartalmú betont kívánunk elkészíteni. Az adalékanyag pépigényét elvileg tehát az adalékanyag tömörségéből számítani lehet $V_{po} = 1 - T$ m^3/m^3 összefüggésből. Ez a számítás az *AFN* keverékekre a valóságos pépigényt adja, mert ilyen konzisztencia mellett vibrodöngölővel lehet tömöríteni és ezzel elérhető az adalékanyagváz maximális tömörsége, amely a (62)-ből számítható.

A betontechnológiai számításokban kényelmesebb az alkotóanyagok térfogatát liter/m^3-ben kifejezni. Ennek megfelelően a $k_s = 40$ s konzisztenciájú keverékbe bedolgozható legnagyobb $V_{ao,40}$ *liter/m^3* adalékanyag-térfogat a (62) átalakításával:

$$V_{ao} = \left(660 - 50 \times \lg\frac{m}{4}\right) + 38 \times e^{-\frac{2}{U-0,5}} \times \left(m - 1,54 \times e^{\frac{1}{U-0,5}}\right) \qquad liter/m^3 \qquad (63)$$

Ebből következően $k_s = 40s$ mellett a $V_{po,40}$ pépigény az (5)-ből és a (63)-ból:

$$V_{ao,40} = 1000 - V_{ao} = \left(340 + 50 \times \lg\frac{m}{4}\right) - 38 \times e^{-\frac{2}{U-0,5}} \times \left(m - 1,54 \times e^{\frac{1}{U-0,5}}\right) \qquad liter/m^3 \qquad (64)$$

Az *AFN*-től eltérő konzisztenciákra a pépigény legfeljebb olyan mértékben növekedhet, amilyen mértékben a keverék vízigénye növekszik. A 3.2.3. fejezet szerint1-1 konzisztencia osztály között a vízigény-különbség 15-20 liter/m^3, ezért folyós konzisztenciára legfeljebb 60-80 liter/m^3-rel lehet nagyobb a pépigény, mint földnedvesre. A többletvíz azonban nemcsak a szemcsefelületeken helyezkedik el – eltávolítva ezáltal egymástól a szemcséket és növelve a közöttük lévő teret - , hanem egy része a szemcsék közötti hézagokba kerül, ezért a pépigény növekménye liter/m^3-ben elmarad a vízigény liter/m^3-ben kifejezett növekményétől. Kísérleteim eredményeit kiértékelve azt állapíthattam meg, hogy önthető konzisztenciára a pépigény növekménye az alig földnedveshez képest legfeljebb 45 liter/m^3. Ezért a $k_s < 40$ s konzisztencia mérőszámú keverékek $V_{po,s}$ pépigénye:

$$V_{po,s} = V_{po,40} + 45 \times e^{-0,1 \times k_s} \qquad liter/m^3 \qquad (65)$$

összefüggésből számítható.

A képlékeny konzisztenciájú, kis cementtartalmú betonokban a homokos kavics tömörségét a (61)-ből lehet számítani, ebből a bedolgozható adalékanyag térfogat:

$$V_{ao} = 650 + \lg(U - 0,5) \times \frac{64}{16 + (m-7)^2} \times 22 \qquad liter/m^3 \qquad (66)$$

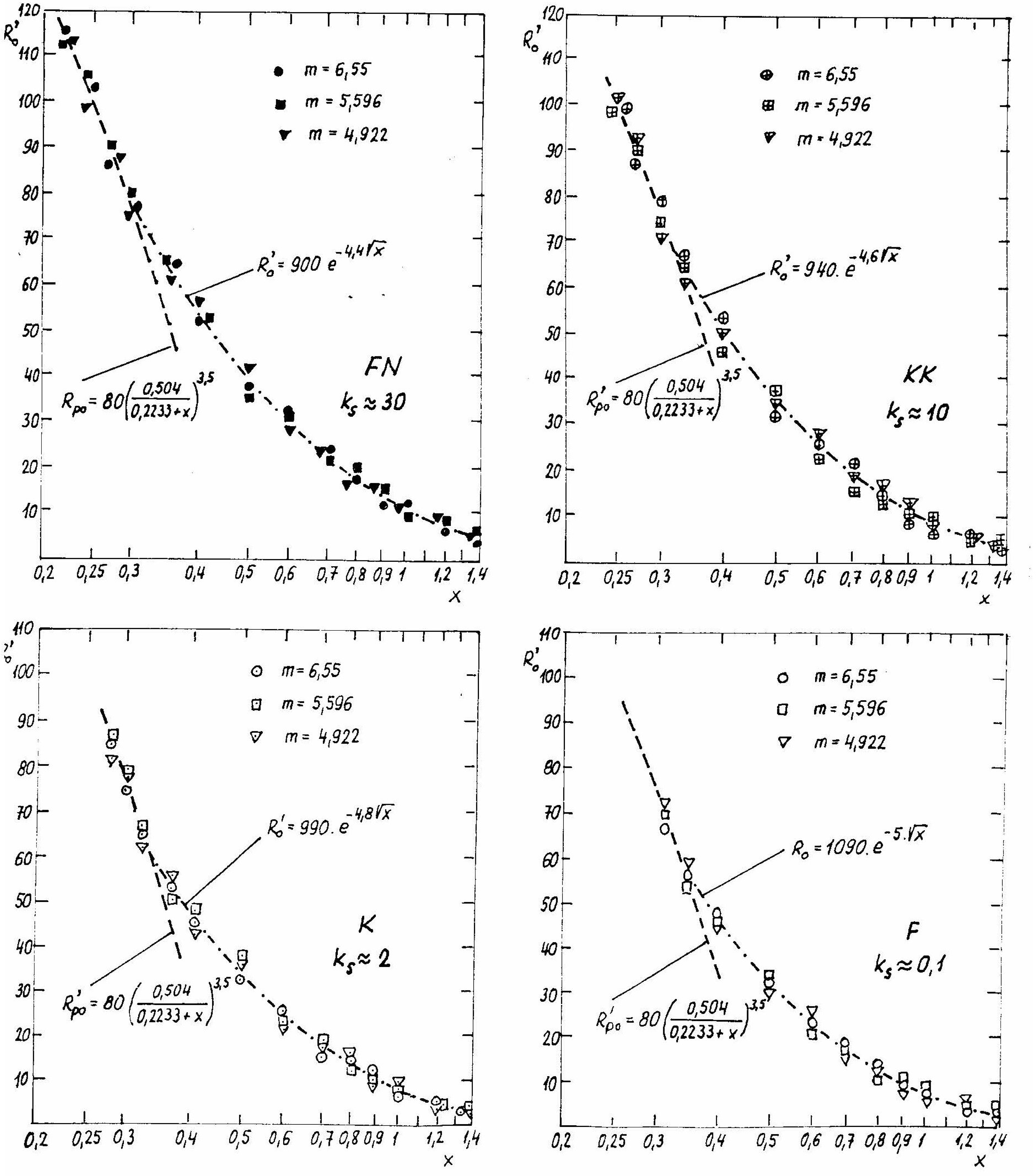
Az adalékanyag képlékeny betonba bedolgozható térfogata viszont a (63) és a (65) szerint (k_s = 2):

$$V_{ao,2} = V_{ao,40} - 45 \times e^{-0,2} \qquad liter/m^3 \qquad (67)$$

A (66) és (67) kifejezésekből kapott adatok összevetéséből azt lehet becsülni, hogy az adott adalékanyag alkalmas-e (van-e elegendő víztartó képessége) kis cementtartalommal is jól tömöríthető keverék kialakítására. Ha a (66) és (67) azonos vagy közel azonos eredményt ad, akkor az adalékanyag megfelelő, ha azonban a (66)-ból kisebb térfogat számítható, mint a (67)-ből, akkor kis cementadagolás mellett nem várható kielégítő tömörség, hanem a betonban a (67) – (66) különbségének megfelelő térfogatú V_{lb} *liter/m^3* levegő marad a hiányos bedolgozás miatt.

Vizsgálataim szerint az adalékanyag pépigényét a szemcsehalmaz geometriai sajátosságai határozzák meg, tömörségét azonban víztartó képessége is befolyásolja. A tömörség és a pépigény számítására kidolgozott összefüggések arra is alkalmasak, hogy a megfelelően tömöríthető sovány, képlékeny betonkeverékekhez felhasználható adalékanyag szemeloszlásokat ki lehessen választani. Ahogyan azt korábban kimutattam {lásd a 32. ábrát}, eredményeim magyarázatot adnak PALOTÁS (57)-ből számítható optimális finomsági modulusának az értelmezésére is.

A cementpép nyomószilárdsága a (93)-ból számítható. Azt a víz-cement tényezőt (víz-cement tényező határértéket, jelölése: x_h), amely a (95)–(98) és a (93) függvények metszéspontjához tartozik,



44. ábra

a függvényekből számított nyomószilárdságok egyenlőségéből lehet meghatározni. A vizsgálataim szerinti alapanyagokkal készített betonok víz-cement tényező határértékei a következők:

FN konzisztenciára	:	$x_n = 0,26$
KK konzisztenciára	:	$x_h = 0,28$
K konzisztenciára	:	$x_h = 0,31$
F konzisztenciára	:	$x_h = 0,32$

$$R'_o = A \times (y - B) \tag{75}$$

A bemutatott számítások alapján tehát valamennyi szilárdságbecslő függvényben $V_l = 0$ mellett csak a víz-cement tényező a független változó s ezért függő változóként a kifogástalanul tömörített $V_l = 0$ beton R'_o 28 napos nyomószilárdsága határozható meg.

A függvények állandóit akkor lehet kiszámítani, ha két szélsőséges $x'–R'_o$ értékpár ismeretes. A szokványos betonkeverékek két határesete pl. az adott adalékanyaggal és cementfajtával készített nagy cementtartalmú ($m_c \approx 500\text{-}600\ kg/m^3$) és kis cementtartalmú ($m_c \approx 100\text{-}125\ kg/m^3$), változatlan konzisztenciájú beton. Ha ilyen szélsőséges keverékek $x_1 – R'_{o1}$ és $x_2 – R'_{o2}$ értékpárjait megvizsgáljuk, akkor a szilárdságbecslő függvények állandói a következő módon számíthatók.

A FERET-féle (69) függvényhez általában nem lehet egyetlen állandót kapni, mert a (76) egyenletből számított A_1 és A_2 – a konstans kitevő miatt – rendszerint nem egyenlő egymással:

$$A_1 = \frac{R'_{01}}{\left(\frac{0{,}3226}{0{,}3226 + x''1}\right)^2} \quad \text{és} \quad A_2 = \frac{R'_{o2}}{\left(\frac{0{,}3226}{0{,}3226 + x_2}\right)^2} \tag{76}$$

A becsléshez célszerű az A_1 és az A_2 átlagát venni állandóként:

$$A = \frac{A_1 + A_2}{2} \tag{77}$$

A POWERS-féle (72) függvény állandói.

$$\lg A = \frac{\lg\frac{0{,}504}{0{,}2233 + +x_1} \times \lg R'_{o2} - \lg\frac{0{,}504}{0{,}2233 + x_2} \times \lg R'_{01}}{\lg\frac{0{,}504}{0{,}2233 + x_1} - \lg\frac{0{,}504}{0{,}2233 + x_2}} \quad \text{és} \quad A = 10^{\lg A} \tag{78}$$

$$B = \frac{\lg R'_{o1} - \lg A}{\lg\frac{0{,}504}{0{,}2233 + x_1}} = \frac{\lg R'_{o2} - \lg A}{\lg\frac{0{,}504}{0{,}2233 + x_2}} \tag{79}$$

Az ABRAMS-függvény (74) exponenciális alakja:

$$R'_o = A \times e^{\ln B \times x} \tag{80}$$

amelynek állandói:

$$A = e^{\frac{x_2 \ln E'_{o1} - x_1 \ln R'_{o2}}{x_2 - x_1}} \quad \text{és} \quad \ln B = \frac{\ln\frac{R'_{o1}}{A}}{x_1} = \frac{\ln\frac{R'_{o2}}{A}}{x_2} \tag{81}$$

Végül a BOLOMEY-féle (75) függvény állandói:

$$B = \frac{R'_{o1} \times \frac{1}{x_2} - R'_{o2} \times \frac{1}{x_1}}{R'_{o1} - R'_{o2}} \quad \text{és} \quad A = \frac{R'_{o1}}{\frac{1}{x_1} - B} = \frac{R'_{o2}}{\frac{1}{x_2} - B} \tag{82}$$

Az állandók számításához szükséges $x_1 – R'_{o1}$ és $x_2 – R'_{o2}$ értékpárokat csak gondosan végrehajtott laboratóriumi vizsgálatokkal lehet megállapítani. E vizsgálatok sikerének sarkalatos kérdése: hogyan lehet a betonkeverékeket úgy tömöríteni, hogy $V_l = 0$ levegőtartalmú beton legyen előállítható., ha pedig a tömörítés nem kifogástalan, azaz $V_l > 0$, akkor a mért nyomószilárdságot hogyan lehet átszámítani a $V_l = 0$ mellett elérhető nyomószilárdságra.

A különböző konzisztenciájú betonkeverékek bedolgozását a próbatestekbe az MSZ 4715 szabályozza (FH: kézi döngölés; KK-K: vibrálás; F: csömöszölés). Ezek a tömörítési módszerek azonban nem mindig elegendőek a kis tömegű betontest készítésére $V_{lb} = 0$ levegőtartalommal, mert hatékonyságuk nem éri el nagy tömegű betonok tömörítésére a kivitelezésben használt eszközökét. A kézi döngölés csak az eredetileg is kis hézagtartalmú adalékanyagból készített, legfeljebb 250-300 kg/m^3 cementtartalmú FN betonkeverékek pórusmentes bedolgozására alkalmas és nem megfelelő az eredetileg nagy hézagtartalmú adalékanyagokból nagy péptartalommal készített betonokhoz.

Vibrálni a betonkeverékeket addig kellene, amíg teljesen tömörré nem válnak, de csak addig szabad, ameddig víztartó képességük megengedi (a pépkiválás meg nem kezdődik). A kis víztartóképességű, képlékeny betonkeverékekhez (homokszegény adalékanyag, kis cementtartalom) alkalmazható vibrálási idő nem elegendő a levegő maradéktalan eltávolítására {lásd 4.3. fejezet, (66) és (67) egyenletet}.

Ezen túlmenően a próbatestek térfogata csekély (20 cm-es kocka: 9 liter; ∅15×30 cm-es henger: 5,3 liter; 15 cm-es kocka: 3,375 liter), ezért saját tömegük nem tömörít, következésképpen a kismennyiségű keverékeket általában nagyobb gondossággal kell bedolgozni, mint a nagyobb tömegűeket, hogy azonos tömörséget lehessen elérni.

A betonkészítési gyakorlatban az AFN-FN betonokat vibropréseléssel, vibrodöngölővel vagy –hengerrel, centrifugálással dolgozzák be, a KK-K betonokat vibrobakon vagy –asztalon, merülő (újabban nagyfrekvenciájú) vibrátorokkal, esetleg vibrogerendákkal, talpvibrátorral, szivattyúval, és sokszor vibrálják az F betonokat is. Ilyen tömörítőeszköz-választék a próbatestek elkészítéséhez általában nincs: a FN betonok kézi döngöléssel, a KK-K betonok laboratóriumi asztalvibrátoron nem tömöríthetők olyan hatékonyan, mint az iparban használatos eszközökkel.

Javítani lehet a kisméretű próbatestek betonjának a tömörségét, ha az AFN-FN konzisztenciájúakat vibrodöngöléssel, a KK-K betonokat először csömöszöléssel, majd vibrálással dolgozzák be. A gondos tömörítés ellenére is előfordulhat, hogy $V_l > 0$, ezért egyrészt pontosan meg kellene tudni állapítani a bedolgozott friss beton levegőtartalmát a próbatestekben, másrészt a $V_l > 0$ levegőtartalmú beton mért R nyomószilárdságát át kell tudni számítani a $V_l = 0$ mellett várható R_o' nyomószilárdságra.

A próbatestek sablonjának névleges méretéből számított térfogat nem szabatos, a tényleges térfogathoz képest ± 4 %-kal is eltérhet, ezért a névleges térfogatból meghatározott levegőtartalom ± 40 liter/m^3-rel térhet el a valóságostól. A szabatos vizsgálat ezért nem nélkülözheti a próbatest térfogatának pontos mérését, amelynek legegyszerűbb módja az 1 napos, kizsaluzott kocka tömegének és vízkiszorítással mért térfogatának az ellenőrzése.

A pórustartalomnak a nyomószilárdságra gyakorolt hatását – főleg kerámiatermékeken – számosan vizsgálták, valamennyi szerző az $R = f(R'_o)$ függvényt kereste. Néhány ezek közül a következő:

BALSIN [68] :
$$R = R_o' \times (1 - V_l)^A \tag{83}$$

RYSHKEVITZ [69]:
$$R = R_o' \times e^{-B \times V_l} \tag{84}$$

SHILLER [70]
$$R = R_o' \times \left(1 - \frac{V_l}{V_{lkr}}\right)^A \tag{85}$$

A (85)-ben V_{lkr} az a kritikus – legnagyobb – pórustartalom, amely mellett az anyagnak még van mérhető nyomószilárdsága).

A bedolgozott friss beton levegőtartalmának a hatását általában a (84) alakú függvénnyel veszik figyelembe. LYDON [72] szerint betonokra jó közelítést ad az alábbi függvény:

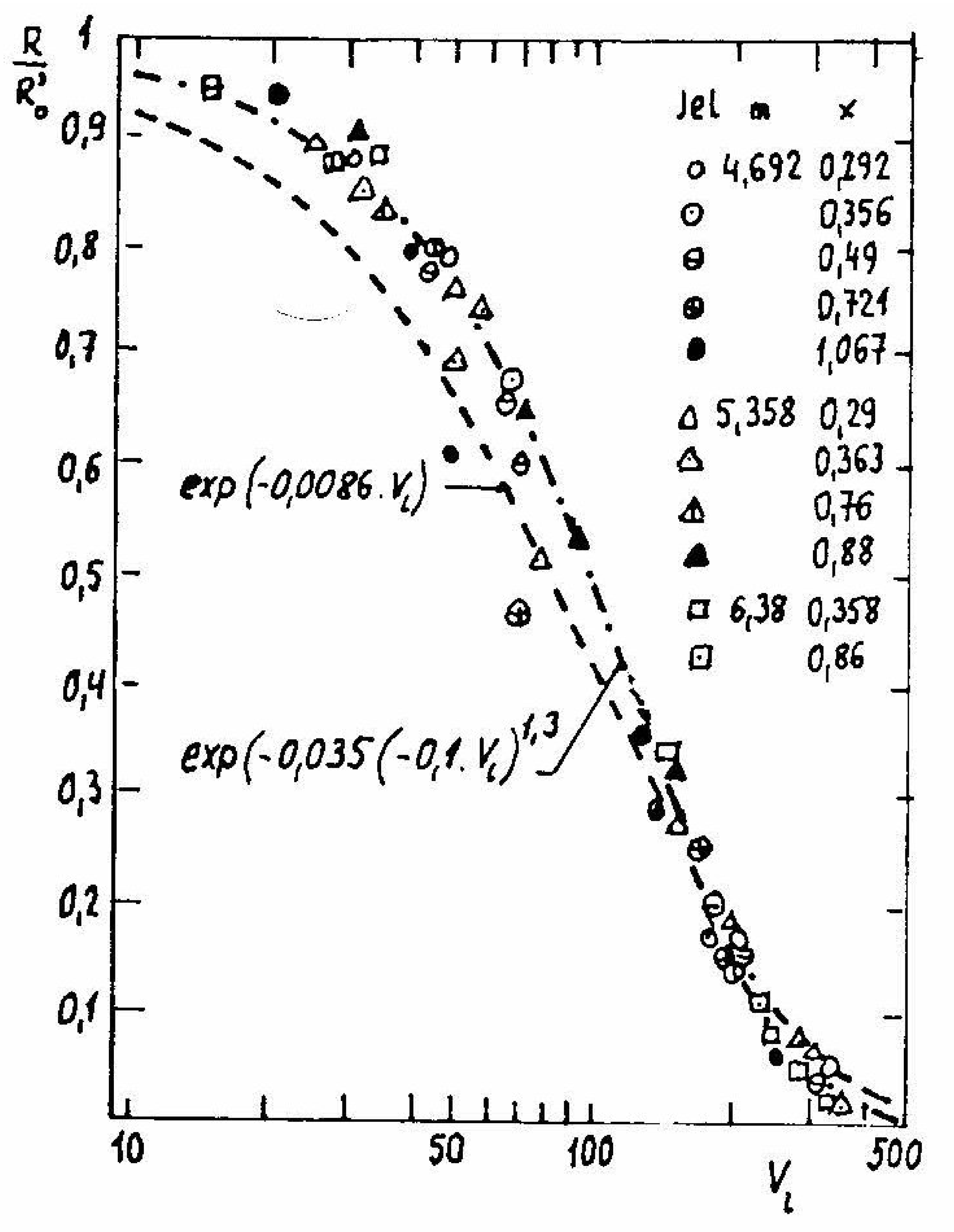
$$R = R_o' \times e^{-0{,}0086 \times V_l} \tag{86}$$

A szilárdságbecslő függvények mindegyikét R'_o -t kifejező alakban adtam meg, ezért alkalmazhatóságuk ellenőrzéséhez a friss beton levegőtartalma és ennek hatása is figyelembe veendő. Az 5.2. fejezetben idevágó vizsgálataimat foglalom össze.

5.2. Vizsgálatok az x-R'_o függvények illeszkedésére

A bedolgozott friss beton levegőtartalmának a nyomószilárdságra gyakorolt hatását 1979 évben ellenőriztem 20 cm élhosszúságú betonkockákkal, amelyek tömegét tömörítés utána azonnal, térfogatát kizsaluzás után, 1 napos korban a lapméretek 0,1 mm pontosságú mérésével ellenőriztem (a hat lap mindegyikén 6-6 méretfelvétellel) [60].

Vizsgálataim eredményeit a 35. ábrában foglaltam össze. Néhány kiugró értéktől eltekintve adataimra jól illeszkednek az alábbi függvények



35. ábra

$$R = R'_o \times e^{-0,035\times(0,1\times V_l)^{1,3}}$$

$$R'_o = R \times e^{0,035\times(0,1\times V_l)^{1,3}} \qquad (88)$$

Meg kell azonban jegyeznem, hogy telítetlen betonokra ($V'_p < V'_{po}$) R'_o csak elméleti értékű, mert a jól tömörített ($V_{lb} = 0$) telítetlen, friss betonban mindig marad $V_l = V_{po} - V'_p$ levegőtartalom. Ezért a telítetlen betonok ténylegesen elérhető nyomószilárdsága az alábbi függvényekből számítható:

$$R = R_o \times e^{-0,035\times(0,1\times V_{lb})^{1,3}} \qquad (89)$$

$$R_o = R \times e^{0,035\times(0,1\times V_{lb})^{1,3}} \qquad (90)$$

Megjegyzem, hogy vizsgálataimhoz egy-egy keverési aránnyal 12 próbakockát készítettem, amelyekből kettőt-kettőt egyformán, fokozatosan csökkenő intenzitással dolgoztam be: például *KK* betonkeverékeket csömöszöléssel + 10 s vibrálással, továbbá 10, 6, 3, 1 és 0 s időtartamú vibrálással.

Az x – R'_o függvények illeszkedését ajánlatos úgy vizsgálni, hogy az x változtatása mellett a többi készítési paraméter legnagyobb része változatlan maradjon. Különböző víz-cement tényezőjű keverékeket – többek között – a következő változatokban lehet készíteni:

- változatlan cement : adalékanyag arány és változatlan adalékanyag-szemeloszlás mellett a víz tömegarányának fokozatos növelése, ezzel együtt a konzisztencia fokozatos lágyítása
- változatlan konzisztencia és cementtartalom mellett az adalékanyag szemeloszlásának (vízigényének) a változtatása, amelynek követeztében a vízadagolást kell tervszerűen változtatni;
- változatlan konzisztencia és adalékanyag-szemeloszlás mellett a betonösszetétel, tehát a cement- és víztartalom tervszerű változtatása.

Az x – R'_o függvények illeszkedése a vizsgálati eredményekre annál megbízhatóbban ellenőrizhető, minél szélesebb tartományban változó víz-cement tényezőket lehet beállítani. Változatlan *c:a* aránnyal és változó konzisztenciával x eltérése csekély. Például *m = 5,676; U = 11,3* adalékanyaggal és *450 pc*-vel készített *1 : 5* cement : adalékanyag tömegarányú keverékekben a víz-cement tényező *AFN* konzisztenciához *0,385*, míg *Ö* konzisztenciához *0,592*.

Valamivel nagyobb az x szélső értékeinek a különbsége – de még mindig csekély – akkor, ha az adalékanyag szemeloszlását változtatjuk. Például *K* konzisztenciához *300 kg/m*^{3} *350 kspc 20* cementet használva *m = 3,981; U = 12,4* homokos kaviccsal *x = 0,787*, míg *m = 7,544; U = 55,9* homokos kaviccsal *x = 0,53* szükséges.

Lényegesen tágabb határok között változhat x, ha változatlan konzisztencia és szemeloszlás mellett a betonösszetétel változik, tehát egyidejűleg változik a cement- és a víztartalom. Az illeszkedést ezért célszerű ilyen betonkeverékekkel vizsgálni, jóllehet így a péptartalom hatását nem lehet kiküszöbölni.

A különböző szilárdságbecslő függvények elméleti vizsgálatából a következők állapíthatók meg:

- a FERET-féle (69) függvény csak akkor illeszkedhet az $x_1 = R'_{01}$ és az $x_2 = R''_{o2}$ vizsgálati értékpárokra, ha a(76) alapján fennáll, hogy

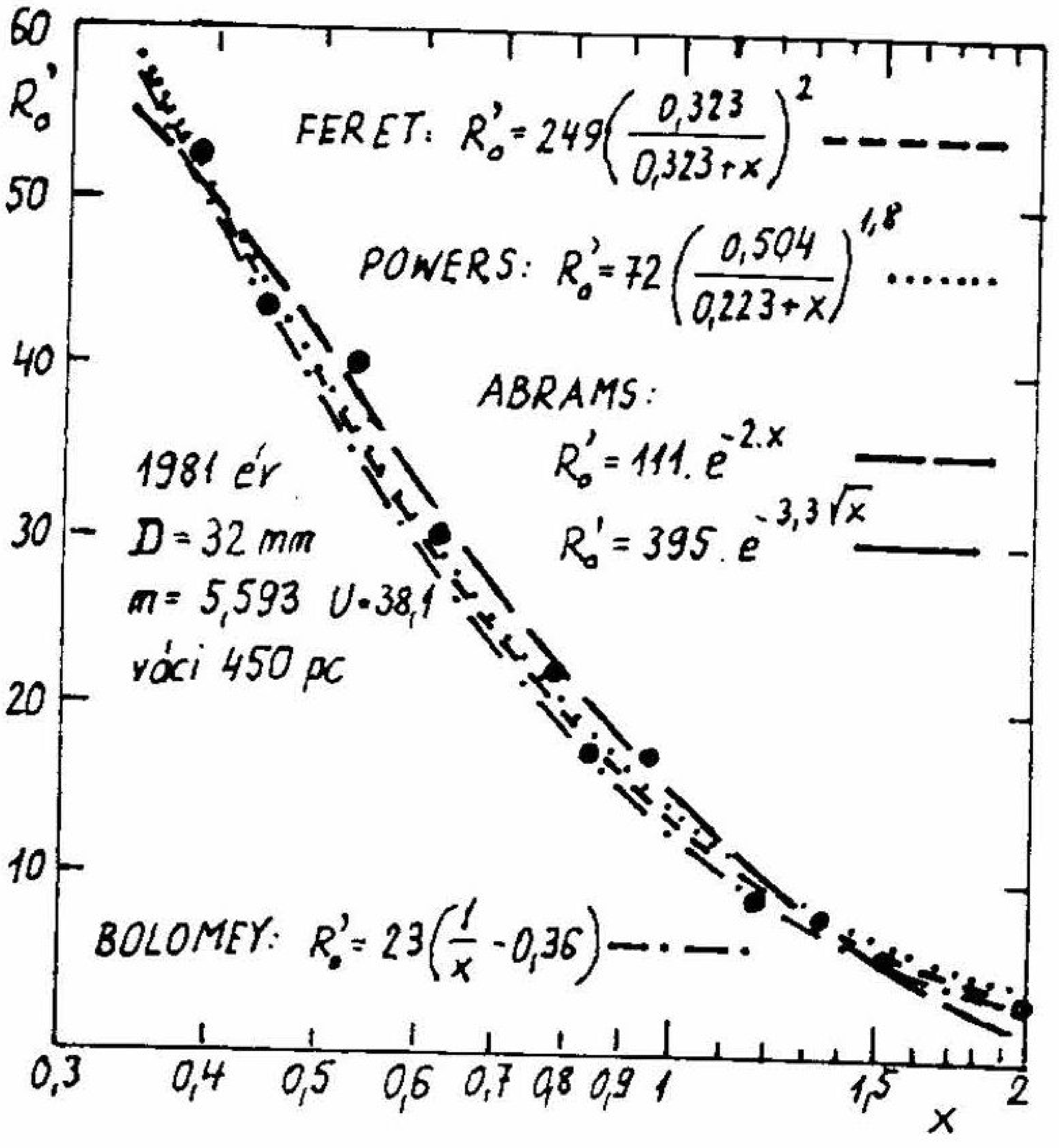
$$R_{o1} = R_{o2} \times \frac{\left(\frac{0{,}3226}{0{,}3226 + x_1}\right)^2}{\left(\frac{0{,}3226}{0{,}3226 + x_2}\right)^2} \qquad (91)$$

  Minden más esetben $A_1 \neq A_2$ és ennek eredményeképpen nincs pontos illeszkedés;

- minél nagyobb R'_{o1} és R'_{o2} különbsége, annál nagyobb a POWERS-féle (73) függvény hatványkitevője, ezért kis víz-cement tényezők mellett a függvény meredekebben emelkedik, mint kis hatványkitevővel;

- a BOLOMEY-féle (75) függvény akkor ad $R'_o = 0$ értéket, amikor $y = 1/x = B$, következésképpen $x > 1$ mellett rohamosan csökkenő nyomószilárdságot kapunk, sok esetben irreális értékeket;

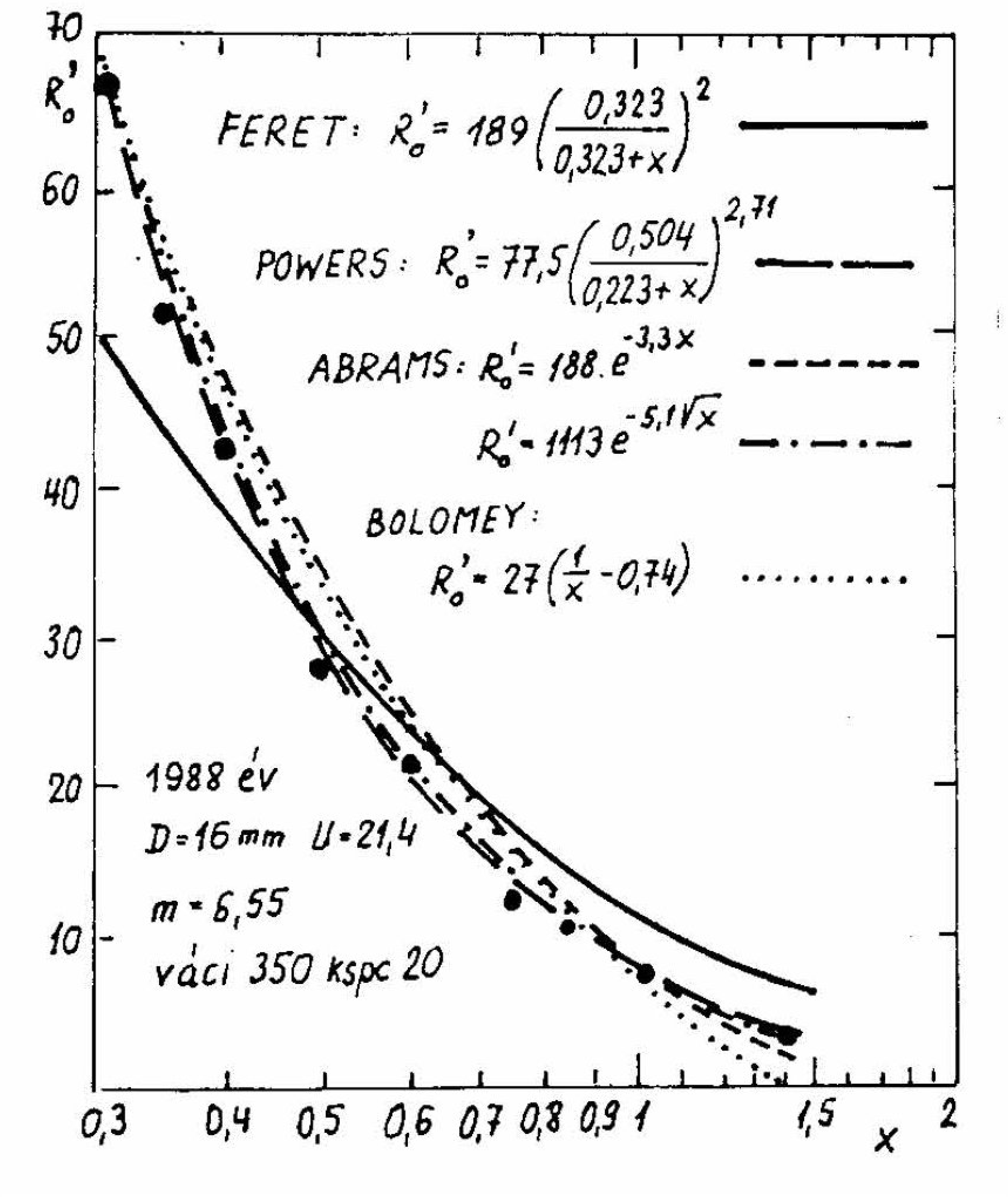
- az $x_1 - x_2$ tartományban az ABRAMS-féle (80) függvénnyel nagyobb nyomószilárdságok számíthatók, mint a másik három függvénnyel, míg $x < x_1$ és $x > x_1$ mellett a (80)-ból kisebb nyomószilárdságok adódnak, mint a (69) – ből és a (73) – ból. Az ABRAMS-függvény azonban a többi függvényhez közelít, ha x alapértéke helyett $x^{0,5}$ felvételével számítjuk az állandókat és a nyomószilárdságokat.



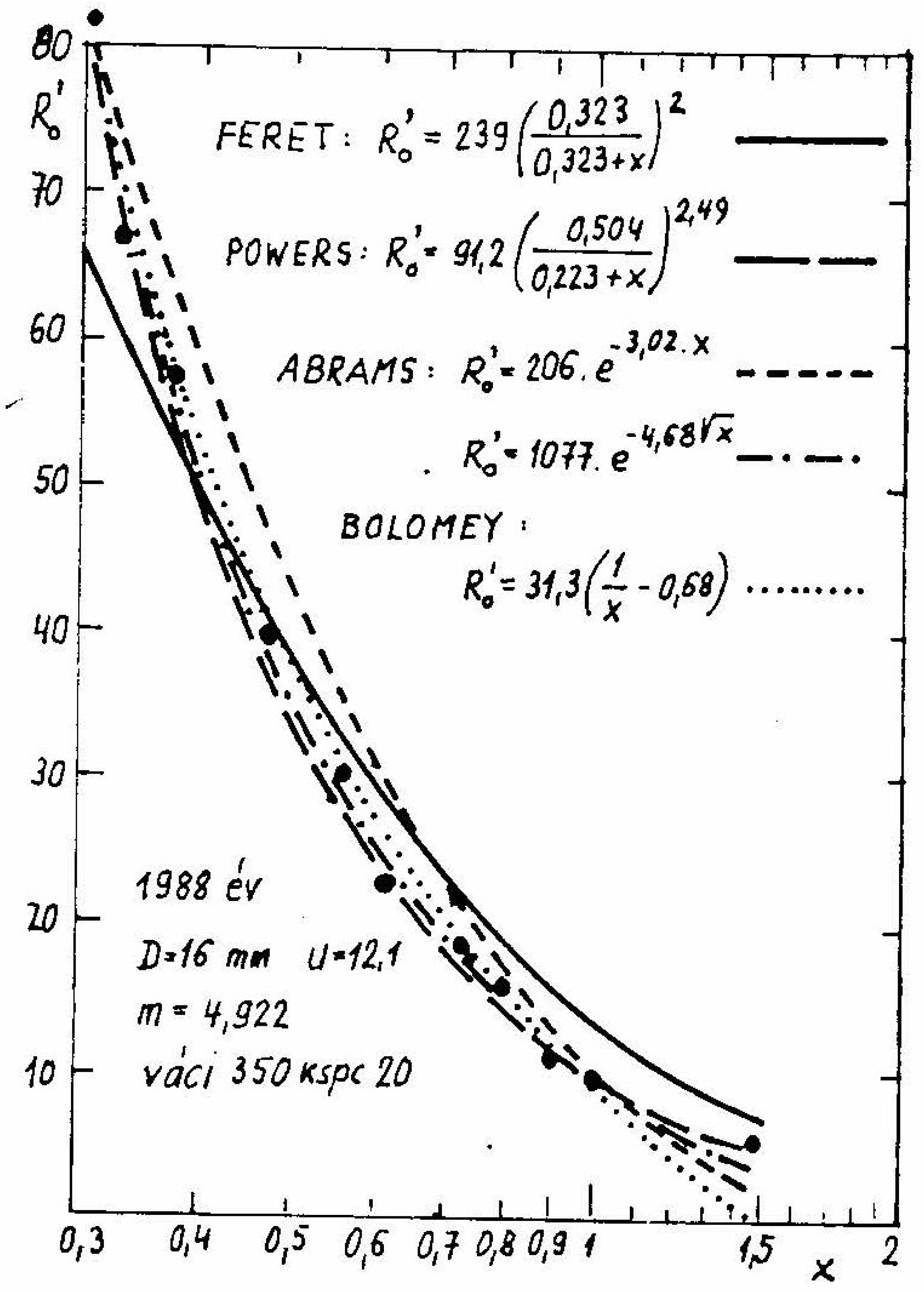
36. ábra

Az illeszkedés vizsgálatára példaként három kísérletsorozat adatait mutatom be a 36. – 38. ábrákon. Az ábrákból eltérő következtetéseket lehet levonni.

A 36. ábrán a különböző szilárdságbecslő egyenletek x-R_o' függvénygörbéi között gyakorlatilag nincs eltérés, legfeljebb az x alapértékére számított ABRAMS-függvény emelkedik kissé magasabbra a többinél. A (91) szerinti feltétel teljesült, ezért a FERET-függvény is jól illeszkedik a vizsgálati eredményekre. A BOLOMEY-függvény B állandója kicsi (*0,36*), ezért a nyomószilárdság csak $x = 2{,}78$ mellett válik zérussá.



37. ábra



38. ábra

A 37. ábra szerinti vizsgálati eredményekre meghatározott FERET-függvényből a nyomószilárdságok becslése nem szabatos, mert nem áll fenn a (91) egyenlőség. Az ábrán bemutatott adatokra az ABRAMS (x) és a BOLOMEY-függvény illeszkedése nem kielégítő, mert a számított értékek x_1 és x_2 között *5-10 N/mm*^{2} –rel nagyobbak a mért nyomószilárdságoknál, ezenkívül a BOLOMEY-függ-vény szerint $x = 1,35$ mellett $R'_o = 0$ s ez irreális érték. Jól illeszkednek viszont a POWERS és az ABRAMS ($X^{0,5}$) függvények.

A 38. ábrán összefoglalt vizsgálati eredményekre jól illeszkednek az ABRAMS ($x^{0,5}$) és a POWERS függvények, valamint a BOLOMEY-függvény $x \leq 1$ mellett (utóbbiból $x = 1,47$ mellett $R'_o = 0$ számítható és ez irreális érték). Az ABRAMS (x) függvény nem ad megfelelő nyomószilárdságot, a FERET-függvényből pedig nem lehet szabatosan becsülni.

A 36.-38. ábrákon feltüntetett vizsgálati eredményekre egyaránt illeszkedik az ABRAMS-függvény $R'_o = A \times e^{\ln B \cdot \sqrt{x}}$ alakban (a továbbiakban: ABRAMS ($X^{0,5}$) függvény), valamint a POWERS-függvény (tehát a hatványfüggvények). Az *A* és *B* állandók azonban nem függetlenek a felhasznált adalékanyag szemeloszlásától és/vagy a betonkeverék konzisztenciájától. A 34. ábrán például az ABRAMS-függvény állandói $A = 1138$ és $\ln B = -5,09$ ($m = 6,55$ és $k_s = 10$), a 35. ábrán $A = 1077$ és $\ln B = -4,68$ ($m = 4,922$ és $k_s = 30$), Ugyancsak nem lehetnek függetlenek az állandók a cement fajtájától, ill. minőségétől.

5.3 A vizsgálatok értékelése, megállapítások

Az $x – R'_o$ szilárdságbecslő függvények illeszkedésének a vizsgálatához gondosan betartott, szabatos laboratóriumi feltételek szükségesek: a bedolgozott friss beton testsűrűségének szabatos mérése, az alapanyagok minőségének változatlansága (homogenizált cement és változatlan szemeloszlású, száraz adalékanyag), a betonkonzisztencia pontos beállítása, vízzáró sablonok, azonos keverés, bedolgozás, utókezelés és nyomószilárdság-vizsgálat. Így is tudomásul kell venni azonban, hogy a víz-cement tényező csak a beton tulajdonságait befolyásoló egyéb tényezőkkel együtt változtatható, mint pl. a cementtartalom, az adalékanyag-szemeloszlás, a péptartalom, a konzisztencia. Ennek eredményeképpen az *x* befolyása a nyomószilárdságra csak más paraméterekkel kölcsönhatásban vizsgálható.

A szabatosan végzett vizsgálatok alapján megállapítható, hogy az általánosan alkalmazott szilárdságbecslő függvények egyke sem alkalmas eredeti alakjában valamennyi beton-változat $x – R'_o$ összefüggésének egységes, egyértelmű leírására. A gyakorlatilag alkalmazott betontartományokban

(m_c = 100 – 600 kg/m^3, x = 0,3 – 1,5) általában kielégítően illeszkedik a POWERS és az ABRAMS ($x^{0,5}$) hatványfüggvény, azonban változatlan függvényállandókkal még az azonos cementminőséggel, de eltérő konzisztenciával vagy adalékanyag-szemeloszlással készített betonok nyomószilárdságát sem lehet kielégítő pontossággal becsüli.

A különböző szilárdságbecslő eljárások gyakorlati ajánlásai mindig rögzítik a függvények érvényességi határait (ezek általában m_c = 150 – 500 kg/m^3, ill. x = 0,4 – 1,2 korlátokat jelentenek), valamint az adalékanyag jellemzőit (pl. folytonos szemeloszlás). Kétségtelen, hogy az érvényességi határok általában a gyakorlat számára kielégítő tartományt fednek le. A cementkötésű keverékek nyomószilárdságának és víz-cement tényezőjének az összefüggésére, az összefüggés jellegére, természetre azonban csak akkor kaphatunk a szokásosnál bővebb információkat, ha a vizsgálatokat az általános gyakorlat határain túl is kiterjesztjük.

E megfontolás alapján a következő fejezetben ismertetett kísérletekbe a cementkötésű keverékek teljes tartományát bevontuk.

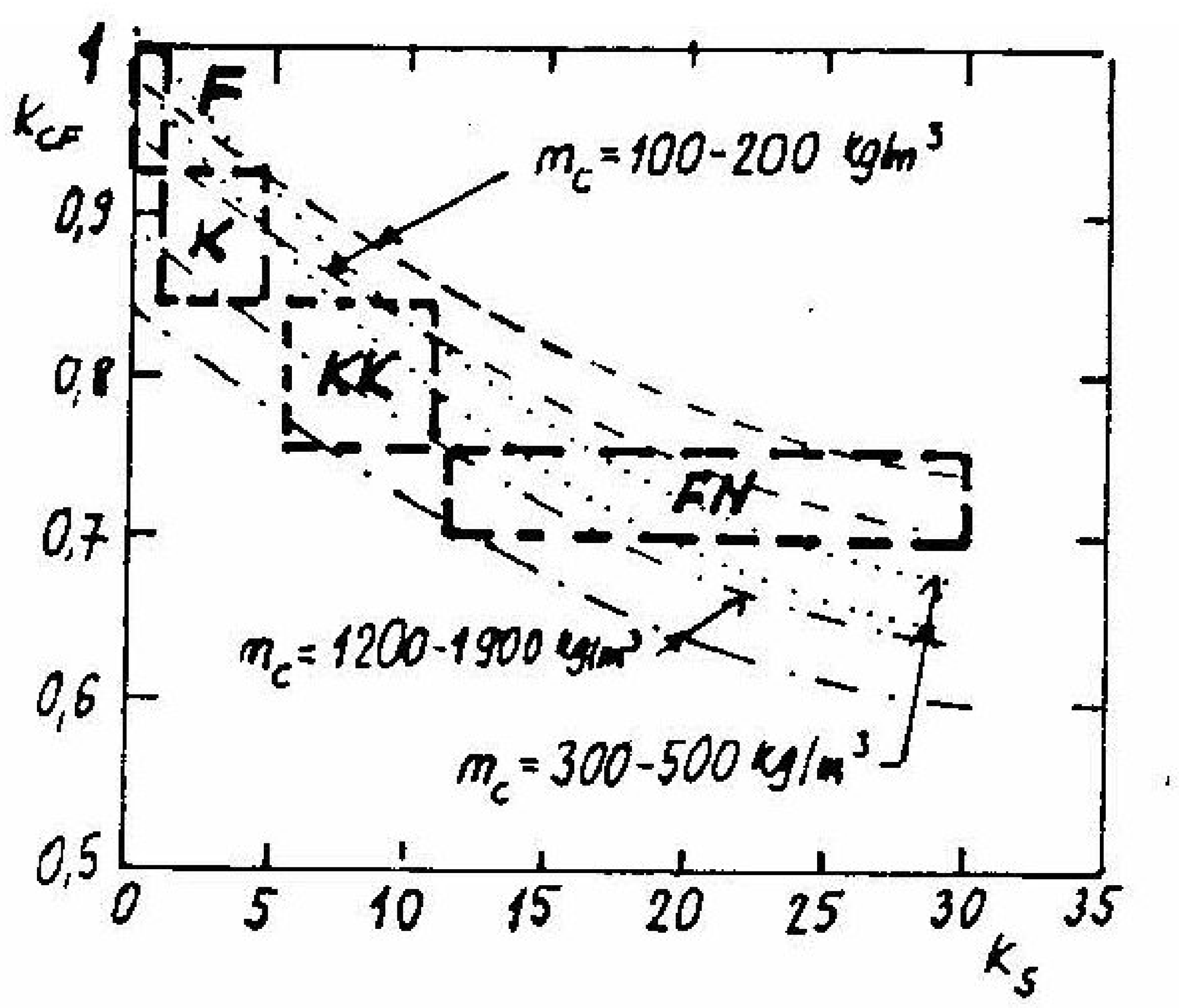
6. A CEMENTKÖTÉSŰ KEVERÉKEK TELJES VIZGÁLATA

6.1. A vizsgálat problémái

A cementkötésű keverékek teljes tartományának alsó határa a minimális cementtartalmú (m_c = 50 – 60 kg/m^3), még valamely mérhető nyomószilárdságot adó betonkeverék, felső határa a tiszta cementpép. A tartomány felső határához közelítő keverékek vizsgálatának két alapvető problémája van:

- a különböző összetételű keverékek konzisztenciája mikor tekinthető azonosnak, milyen konzisztencia-vizsgáló eszközzel lehet megbízhatóan ellenőrizni a cementpép, vagy a minjmális cementtartalmú keverékek bedolgozhatóságát;
- hogyan lehet homogén cementpép-keverékeket készíteni, milyen következményekkel jár a *FN-KK* cementpépek csekély víz-cement tényezője, ez ennek következtében csökkenő hidratációs fok és repedezés-veszély.

A konzisztencia vizsgálatának gondjait már a 3.2.1. fejezetben említettük. A minimális cementtartalmú (m_c = 100 – 150 kg/m^3) keverékek konzisztenciája általában nem vizsgálható roskadással, terüléssel, átformálással vagy VEBE-eszközzel, mert egyrészt a kohézió nem elegendő arra, hogy a kúpformába bedolgozott beton szétpergését a kúp levétele után megakadályozza (legfeljebb a nagy finomhomok tartalmú adalékanyaggal készített keverék marad egyben), másrészt a péptartalom olyan csekély, hogy a VEBE-eszköz ellenőrző lapjának a felületét nem képes maradéktalanul bevonni (legfeljebb a kis pépigényű adalékanyaggal készített kis cementtartalmú keverékek k_v értéke mérhető).

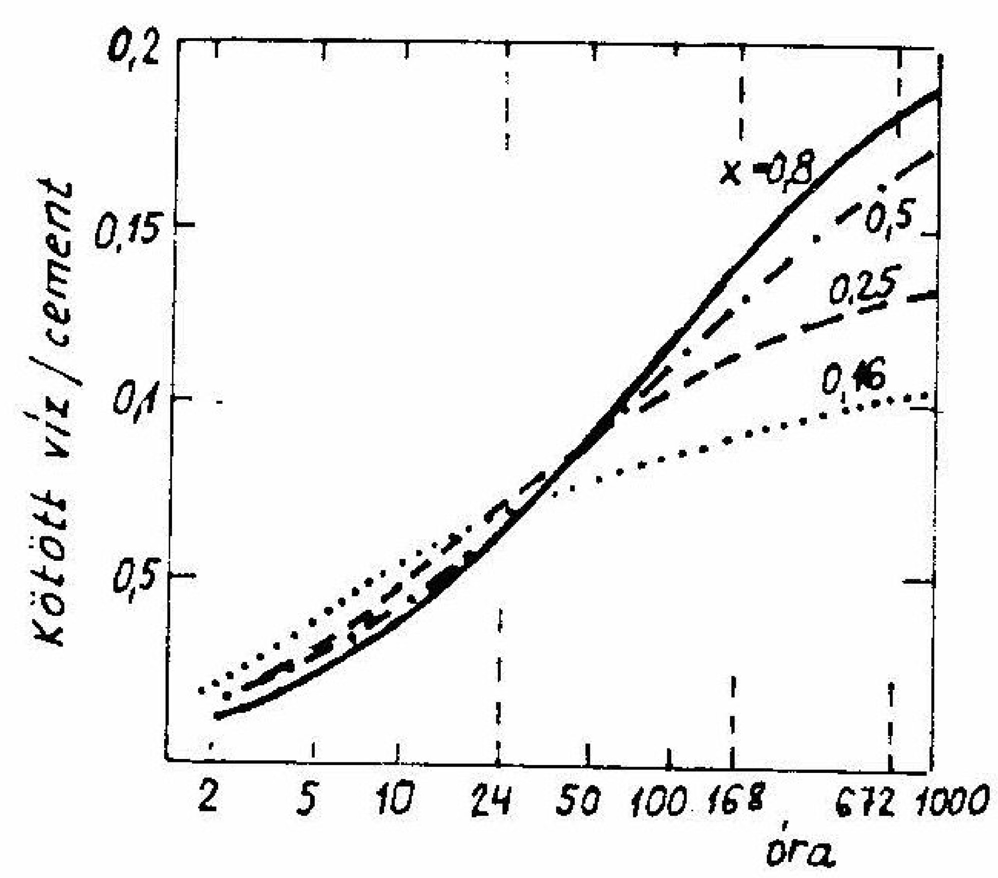


39. ábra

A RILEM-Glanville készülék hátránya, hogy nem független a cementtartalomtól: minél nagyobb m_c, annál ragacsosabb a keverék, és így laza állapotban még akkor is kis halmazsűrűségű, ha a vibrálás hatására 1-2 s alatt tömörödik.

Ezért az azonos konzisztenciát elsősorban a k_s értékéel ellenőriztem [38]. Ennek a vizsgálati módszernek az a hátránya, hogy az erősen képlékeny – önthető tartományban k_s értékének néhány tized secundummal való megváltozásához tetemes konzisztencia-változás tartozik, és így a folyósabb betonok szabatos ellenőrzése bizonytalan. E bizonytalanságok feloldására sok esetben párhuzamosan vizsgáltam a konzisztencia k_s és k_{CF} mérőszámait. E kettős értékelés várható tendenciáira a 39. ábrából lehet következtetni. A konzisztencia beállításához segítséget ad a vízigény-becslés 3.2.2. – 3.2.3. fejezetben közölt módszere.

A betonok, de különösen a cementpépek készítésekor fokozott jelentősége van az utókezelésnek. A nagy cementtartalmú *AFN – KK* keverékek hajlamosak a csomósodásra, ennek eredményeképpen az összetapadt cementszemcse-csomóknak csak a külső burka hidratizálódik, a magja nem. Ezt intenzív keveréssel lehet kiküszöbölni, amelynek során a keverésen kívül nyíróhatás is érvényesül (erre a célra a cukrászati keverőt megfelelőnek találtam). A keverődobba először a vizet öntöttem, ebbe szórtam a cement egy részét, majd lassú fordulatú keverés közben fokozatosan a cement többi részét (kb. 30 s keverés), ezt követően a leggyorsabb keverési fokozaton még kb. 60 s időtartamon át kevertem.



40. ábra

A hidratáció mértéke nem független a víz-cement tényezőtől; TAPLIN [73] – [74] vizsgálatai alapján a 40. ábra szerint változik, amelyből – számításaim szerint – a kötött víznek a cementre vonatkoztatott w_k tömegaránya 28 napos korra, szokványos utókezelés mellett (+20 °C, 7 napig víz alatt, utána szobalevegőn) az alábbi egyenlettel határozható meg:

$$w_k = 1{,}13 \times \left(\sqrt[20]{x} - 0{,}83\right) \tag{92}$$

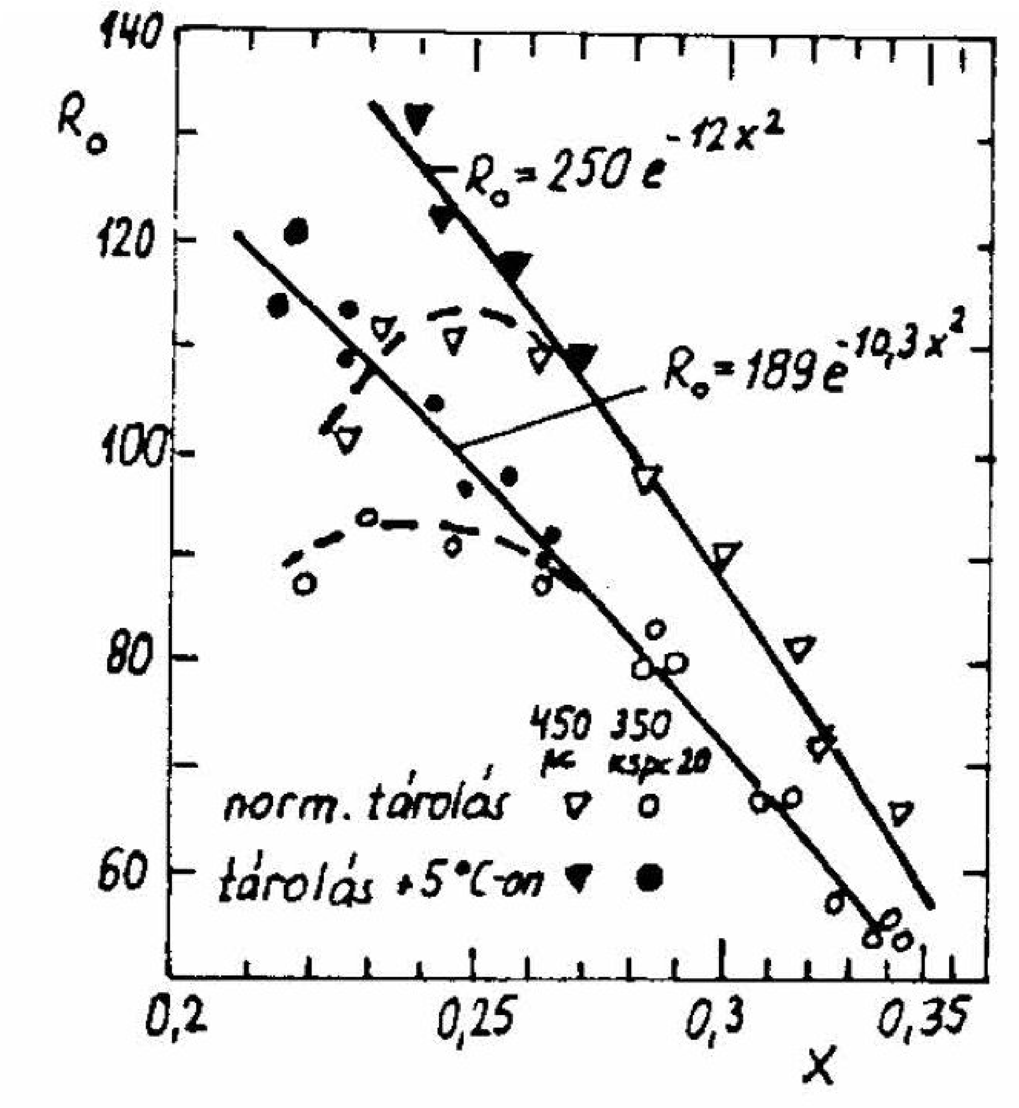
A megszilárdult cementpép tulajdonságait azonban nemcsak a hidratációs fok, hanem a kötés és a korai szilárdulás körülményei is befolyásolják, elsősorban azok a hatások, amelyek a struktúra – főleg a diszlokációk – kialakulását határozzák meg. Ezek közül a hidratációs hő mértéke és eloszlása különösen fontos, mert a korai repedezés nagymértékben a hőfejlődés következménye [75].

A cementpép-próbatestek felmelegedésének a csökkentése érdekében $x \leq 0{,}26$ mellett a készítés után a sablonba tömörített próbatestet műanyag fóliába burkoltam a vízelpárolgás megakadályozására és az első 24 órában kb. +5 °C hőmérsékleten tároltam, egy napos korban kizsaluztam és kb. +15 °C hőmérsékletű vízbe helyeztem 2 hét időtartamra.

6.2. A cementpépek vizsgálata

A cementpépeket a 6.1. fejezetben leírt módon cukrászati keverőben kevertem és a konzisztenciához illesztett tömörítéssel dolgoztam be 15 cm élhosszúságú kockaformába (*AFN-FN:* HILTI-kalapács; *KK-F:* csömöszölés és vibrálás ÉPGÉP RZ-4 asztalvibrátoron; *Ö:* tömörítés nélkül). Az $x \leq 0{,}26$ víz-cement tényezőjű péptestek egy részét az első 24 órában laboratóriumi hőmérsékleten (átlag +20-25 °C), más részét kb. +5 °C hőmérsékleten tároltam, valamennyi próbatestet – sablonnal együtt – műanyag fóliába burkolva, majd kizsaluzás után 1 napos kortól 14 napos korig víz alatt, ezt követően törésig szobalevegőn tartottam. Az $x > 0{,}26$ víz-cement tényezőjű próbatesteket szabványos módon utókezeltem.

A 3. táblázatban a szokványos módon (+20-25 °C) utókezelt péptestek adatai láthatók, a 4. táblázatban pedig azoké a péptesteké, amelyeket $x \leq 0{,}26$ mellett +5 °C-on tároltam az első 24 órában. A nyomószilárdságokat a víz-cement tényező függvényében a 41. ábra mutatja *be*.



41. ábra

A cementpépek nyomószilárdságának a becslésére az ABRAMS-képlet exponenciális alakját használtam. Számításaim szerint a víz-cement tényező négyzetét alkalmazva a számított és a mért nyomószilárdságok korrelációja szorossá vált. Erre a függvényalakra abból is következtetni lehet, hogy a megszilárdult pép levegőtartalma a víz-cement tényező növekedésével rohamosan nő. Adott víz-cement tényezőjű pép cement- és víztartalmát a (26) – (27)-ből lehet meghatározni: pl. $x = 0{,}6$ mellett $m_{cp} = 650\ kg/m^3$ és $m_{wp} = 650\ kg/m^3$, 28 napos korban a kémiailag kötött víz a (92) szerint $w_k = 0{,}16$ tömegrész, tehát 177 kg/m³, így a 28 napos megszilárdult pép levegőtartalma kb. 470 liter/m³, közel 50 térfogat %. Ebből következik, hogy $x = 0{,}6$ mellett már csak igen csekély pépszilárdság várható, és a szilárdságnak ezt a meredek csökkenését a (80) szerinti exponenciális függvény x^n alkalmazásával követi. A 41. ábrán megadott egyenletekből pl. 350 kspc 20 cementtel $x = 0{,}6$ mellett $R_o = 4{,}6$ *MPa* számítható s ez $V_l \approx 470\ liter/m^3$ pórustartalomra valószínű érték.

Megvizsgáltam a POWERS-függvény illeszkedését is a vizsgálati adatokra, és azt találtam, hogy a 350 kspc 20 cementtel készített pépekre

$$R_{po} = 82 \times \left(\frac{0{,}504}{0{,}2233 + x} \right)^{3{,}2} \qquad (93)$$

képlet jól illeszkedik.

Összehasonlítva a 350 kspc 20 cementre a 41. ábrán megadott képlettel és a (93) képlettel számítható nyomószilárdságokat, a következő eredményeket kaptam:

x	0,25	0,3	0,35	0,4	0,6	1	
ABRAMS	99	75	54	36	5	0,01	MPa
Powers	100	73	54	41	17	5	MPa

Adott konzisztenciájú cementkötésű anyagok nyomószilárdságának egyik szélső értékét – a cementpép nyomószilárdságát – az ismertetett módon vizsgálni, ill. x – R_{po} összefüggését elegendő vizsgálati eredmény birtokában számítani lehet. Feltételezhető, hogy a cementpépek szilárdságvizsgálatával a beton nyomószilárdságának az alakulásához további információkat lehet kapni. A következő fejezetben ezeket foglalom össze.

6.3. Vizsgálatok különböző konzisztenciájú betonkeverékekkel

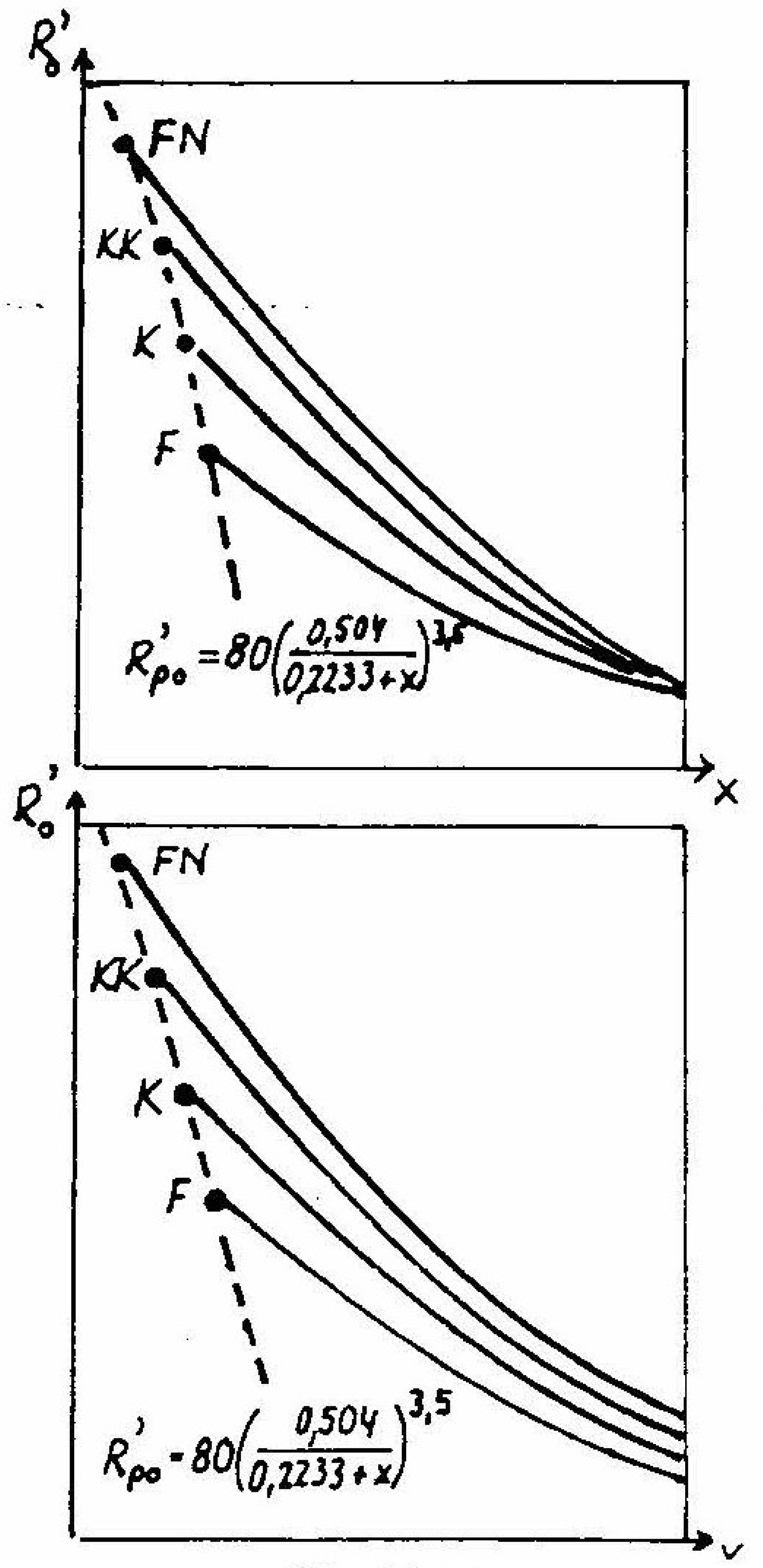
6.3.1. Hipotézis a teljes tartományban várható nyomószilárdságokra

A 6.2. fejezetben a különböző konzisztenciájú cementpépekből készített próbatestek nyomószilárdságának adatait ismertettem. Vizsgálataim szerint a váci 350 kspc 20 (R_c = *42,3 MPa*) cementből készített próbatestek nyomószilárdsága a (93), míg a váci 450 pc (R_c = *45,7 MPa, S = 325* m^2/kg) cementekből készített próbatesteké

$$R_{po} = 98 \times \left(\frac{0{,}504}{0{,}2233 + x} \right)^{3{,}3} \qquad (94)$$

összefüggésből számítható.

Az adott 350 kspc 20 cementtel készített különböző konzisztenciájú péptestek nyomószilárdsága a (93)-ból meghatározva a következő:



42. ábra

Konzisztencia	AFN	FN	KK	K	F	Ö
k_s	40	25	10	2	0,1	0
x_p	0,22	0,23	0,25	0,28	0,31	0,35
$R_{op} = R'_{op}$ MPa	124	115	100	82	68	54

A cementkötésű keverékek víz-cement tényezője és nyomószilárdsága közötti összefüggést ábrázoló függvénygörbének az egyik végpontja, szélső értéke az adott konzisztenciájú cementpép víz-cement tényezőjéhez tartozó nyomószilárdság kell, hogy legyen. Ebből következik, hogy növekvő cementtartalommal és csökkenő víz-cement tényezővel készített, változatlan konzisztenciájú beton-keverékek x – R'_{op} összefüggését ábrázoló függvénygörbe az adott konzisztenciájú cementpép nyomószilárdságához csatlakozik.

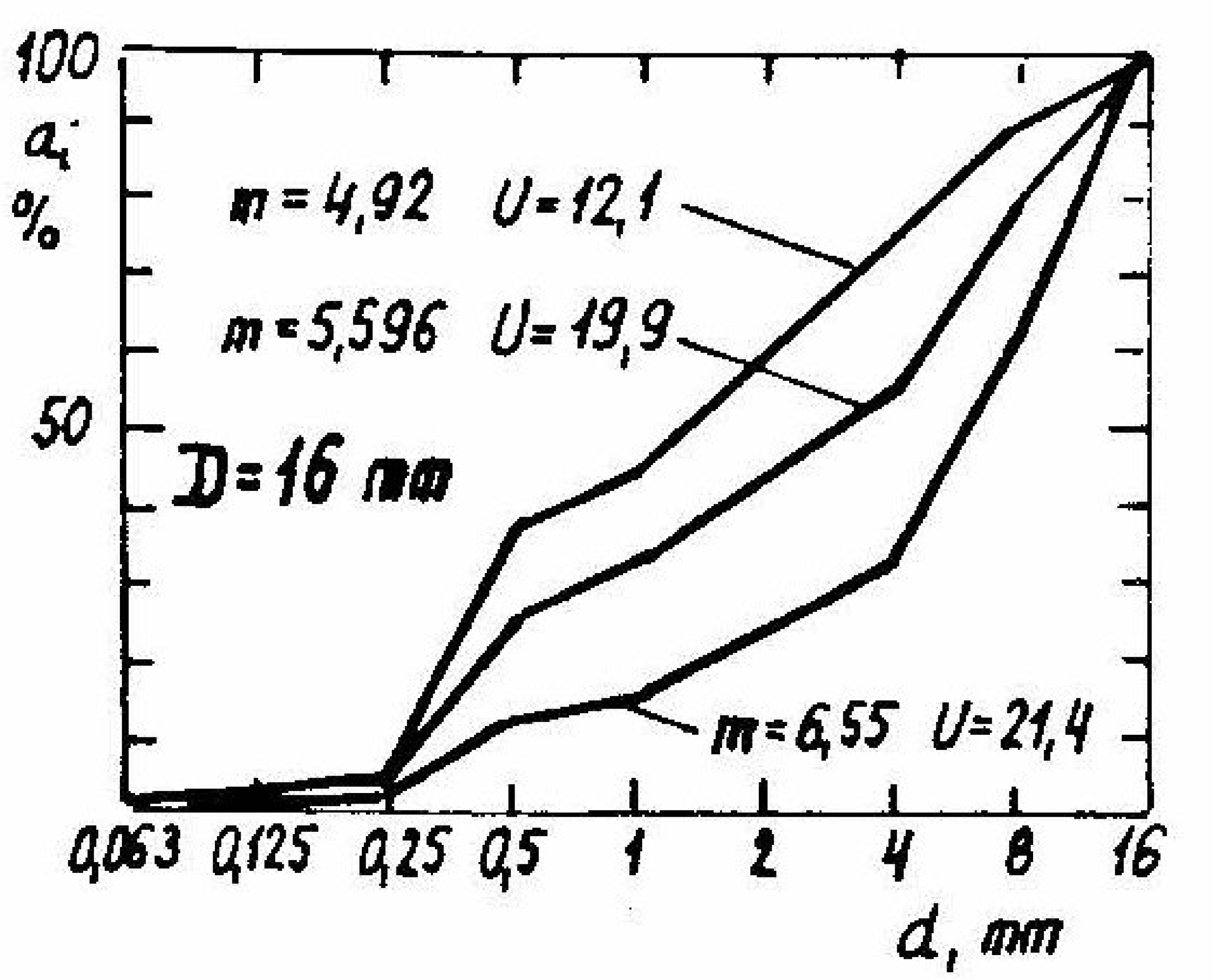
Az ABRAMS-féle hatványfüggvény exponenciális alakjában a cementpép nyomószilárdságát x^2, a betonkeverékét $x^{0,5}$ fejezi ki, ezért a cementpép $R'_o = f(x^2)$ függvénye x növekedésekor meredekebben csökken, mint a betonkeverék $R'_o = f(x^{0,5})$ függvénye. Emiatt utóbbi, legalábbis kis víz-cement tényezők mellett, nem jellemezhető egyetlen görbével, hanem csak görbesereggel.

Az $R'_o = f(x^{0,5})$ függvénygörbe (vagy függvénygörbék) másik végpontja a kis cementtartalmú, nagy víz-cement tényezőjű betonkeverékek nyomószilárdsága. Ha ez a nyomószilárdság független a konzisztenciától, akkor az R'_{po}-ból induló görbék egy pontban futnak össze (42/a ábra), ha azonban a sovány betonok nyomószilárdsága is konzisztencia-függő, akkor az x – R'_o függvénygörbék a 42/b ábrának megfelelően rendeződnek.

A 42. ábra szerinti hipotéziseket a következő fejezetben leírt vizsgálatokkal ellenőriztem.

6.3.2. Vizsgálatok betonkeverékekkel

A 43. ábra szerinti szemeloszlású homokos kavicsokból és váci 350 kspc 20 cementből (R_o = *42,3 MPa; S = 295 m*^{2}*/kg*) különböző konzisztenciájú- betonkeverékeket, ill. 15 cm élhosszúságú próbatesteket készítettem. Az adalékanyag vízigényét a (32), pépigényét a (64)–(65), a keverékek vízadagolását a (35) és a (38)–(40) egyenletekből számítottam. A vizsgálatok eredményeit az 5. táblázat foglalja össze.



43. ábra

A táblázatok adatai szerint konzisztencia-osztályonként 10-15 sorozat betonkeverék készült (sorozatonként 3-3 db 15 cm élhosszúságú kocka) *x = 1,4* víz-cement tényezőtől kezdve fokozatosan csökkenő víz-cement tényezőkkel és fokozatosan növekvő cementtartalmakkal a tiszta cementpépig bezárólag, a 28 napos nyomószilárdság vizsgálatára. A próbatesteket a 4. táblázatban megadottak szerint utókezeltem.

A cementkötőerő ingadozása hatásának kiküszöbölésére valamennyi betonkeveréket ugyan-abból a szállítmányból származó cementtel állítottam elő. A víztartalom számításához a légszáraz adalékanyag mért nedvességtartalmát – amely 0,2 – 0,8 tömeg % között változott – figyelembe vettem.

Az 5. táblázat adatait a 44. ábrán dolgoztam fel, ahol a különböző adalékanyagokkal készített azonos konzisztenciájú keverékek nyomószilárdsági láthatók a víz-cement tényező függvényében. A 44. ábrából megállapítható, hogy a 42. ábrán bemutatott feltételezéseim helytállóak, mert az azonos adalékanyaggal készített keverékek szilárdsága valóban a konzisztencia szerint rendeződik, de pontosítani kell. Az ábráról ugyanis azt lehet leolvasni, hogy a különbözőkonzisztenciájú keverékeknek $x - R'_o$ görbéi a cementpép $x - R'_{po}$ görbéjét nem az adott konzisztenciához tartozó víz-cement tényező, hanem ennél valamivel nagyobb x függőlegesében metszik.

Vizsgálatain eredményeit az alábbi szilárdságbecslő egyenletekkel lehet közelíteni:

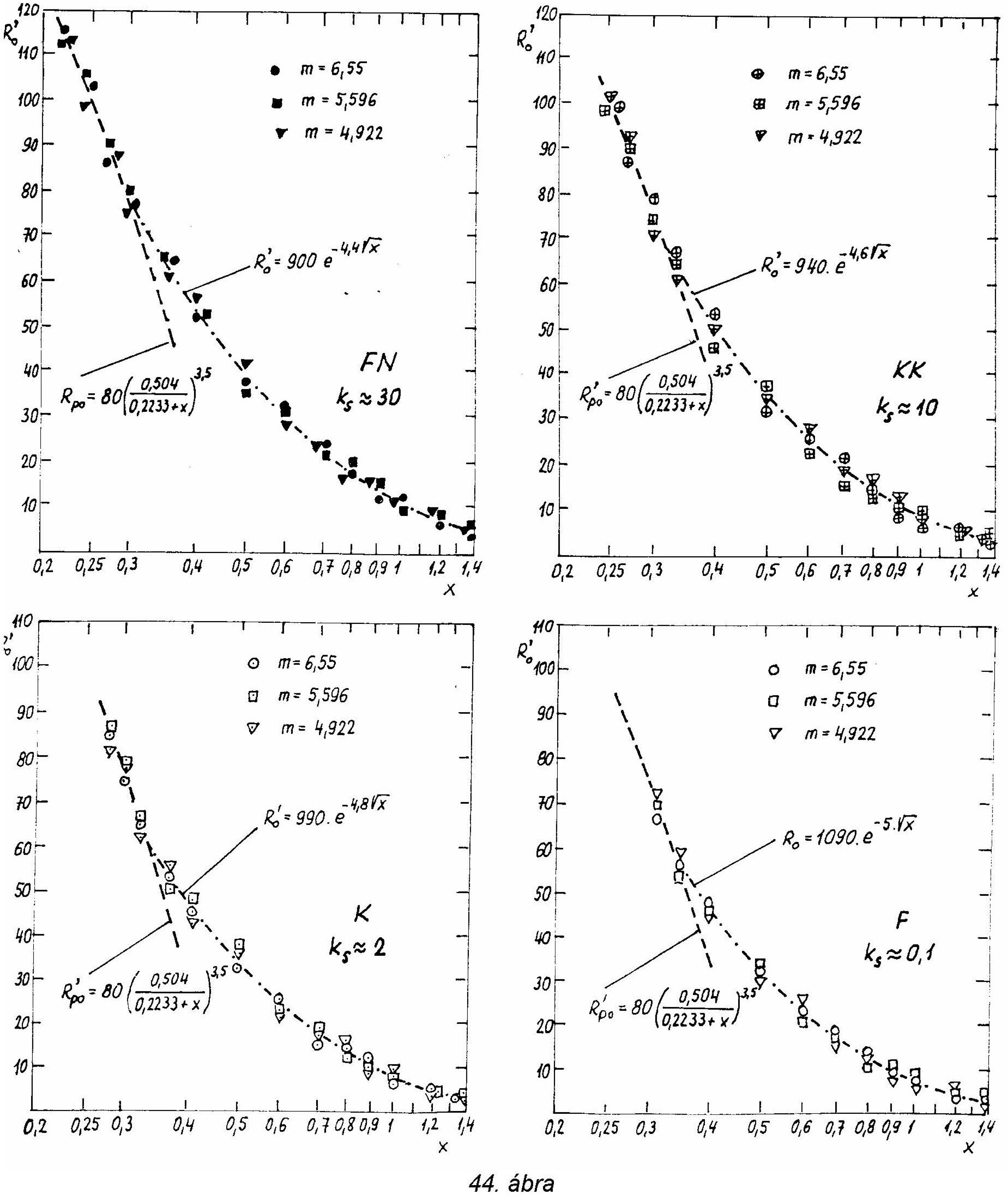
FN (k_s = 30) *konzisztencia:* $R'_o = 900 \times \exp(-4{,}45 \times x^{0,5})$ (95)

KK (k_s = 10) *konzisztencia* $R'_o = 940 \times \exp(-4{,}60 \times x^{0,5})$ (96)

K (k_s =2) *konzisztencia* $R'_o = 990 \times \exp(-4{,}80 \times x^{0,5})$ (97)

F (k_s = 0,1) *konzisztencia* $R'_o = 1090 \times \exp(-5{,}00 \times x^{0,5})$ (98)

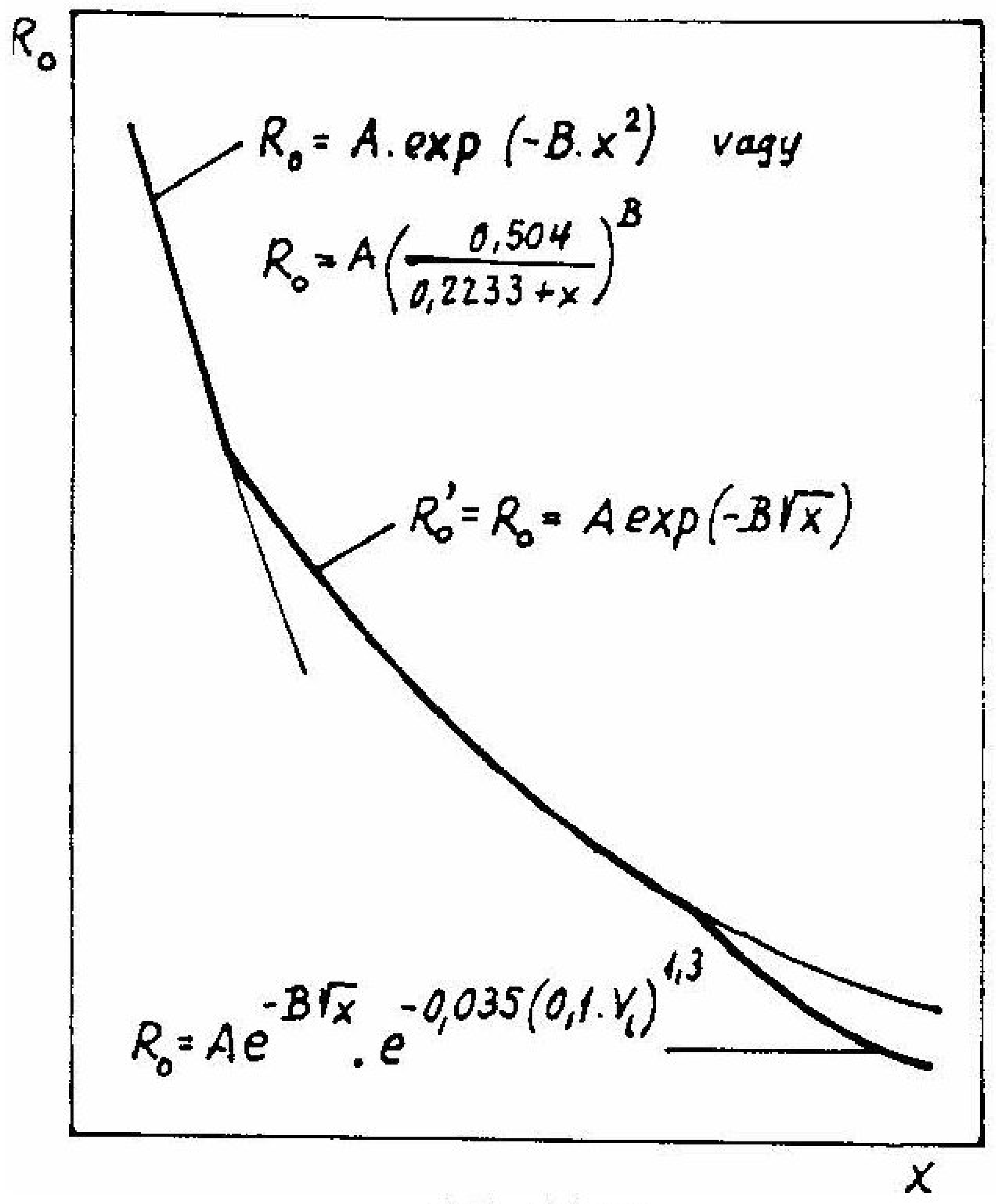
A cementpép nyomószilárdsága a (93)-ból számítható. Azt a víz-cement tényezőt (víz-cement tényező határértéket, jelölése: x_h), amely a (95)–(98) és a (93) függvények metszéspontjához tartozik,



44. ábra

a függvényekből számított nyomószilárdságok egyenlőségéből lehet meghatározni. A vizsgálataim szerinti alapanyagokkal készített betonok víz-cement tényező határértékei a következők:

FN konzisztenciára	:	$x_n = 0,26$
KK konzisztenciára	:	$x_h = 0,28$
K konzisztenciára	:	$x_h = 0,31$
F konzisztenciára	:	$x_h = 0,32$



45. ábra

Ennek megfelelően az x – R'_o összefüggésnek a víz-cement tényezők (és az ezeknek megfelelő telítettségi állapotok) szerint rendeződő három szakasza különböztethető meg (lásd a 45.ábrát):

- az első szakasz $x \leq x_h$ (cementpépek, ill. nagymértékben túltelített betonok), ahol a keverékek nyomószilárdsága a 41. ábra szerinti ABRAMS (x^2) vagy a (93) – (94) szerinti POWERS függvényekkel írható le és ahol $R_o = R'_o$;
- a második szakasz $x \geq x_h$ (kisebb mértékben túltelített, ill. telített betonok), ahol a keverékek nyomószilárdsága az ABRAMS ($x^{0,5}$) függvénnyel írható le és ahol $R_o = R'_o$;
- a harmadik szakasz $x > x_h$ (telítetlen betonok), ahol a keverékek nyomószilárdsága az ABRAMS ($x^{0,5}$) függvénnyel írható le, kiegészítve a friss, bedolgozott beton levegőtartalmát (a telítetlenség mértékét) figyelembe vevő (87) függvénnyel, minthogy a péphiány miatt törvényszerűen $V_l > q$, és ezért $R'_o > R_o$.

Az x_h víz-cement tényező határértékek fizikailag is értelmezhetőnek tűnnek. A 3.2.3. fejezet szerint a betonkeverékek vízigénye a cementtartalmat tekintve három szakaszra osztható:

- $m_o \leq m_{c1}$, ahol $m_w = m_{wo}$ {m_{c1} a (34) egyenletből számítható};
- $m_{c1} \leq m_c \leq m_{c2}$, ahol m_w a (39)-ből, m_{c2} a (33)-ból számítható és a keverékek víztartalma a 15.ábra szerint enyhén növekszik;
- $m_c > m_{c2}$, ahol m_w a (40)-ből számítható és a keverékek víztartalma a 15. ábra szerint rohamosan növekszik.

m	k_a	m_{c2}	m_w	x
6,55	30	547	155	0,283
5,596	30	640	179	0,28
4,922	30	706	197	0,277
6,55	10	573	180	0314
5,596	10	662	206	0,31
4,922	10	726	223	0,308
6,55	2	583	204	0,35
5,596	2	667	231	0,346
4,922	2	725	249	0,343
6,55	0,1	585	231	0,395
5,596	0,1	665	259	0,39
4,922	0,1	718	277	0,386

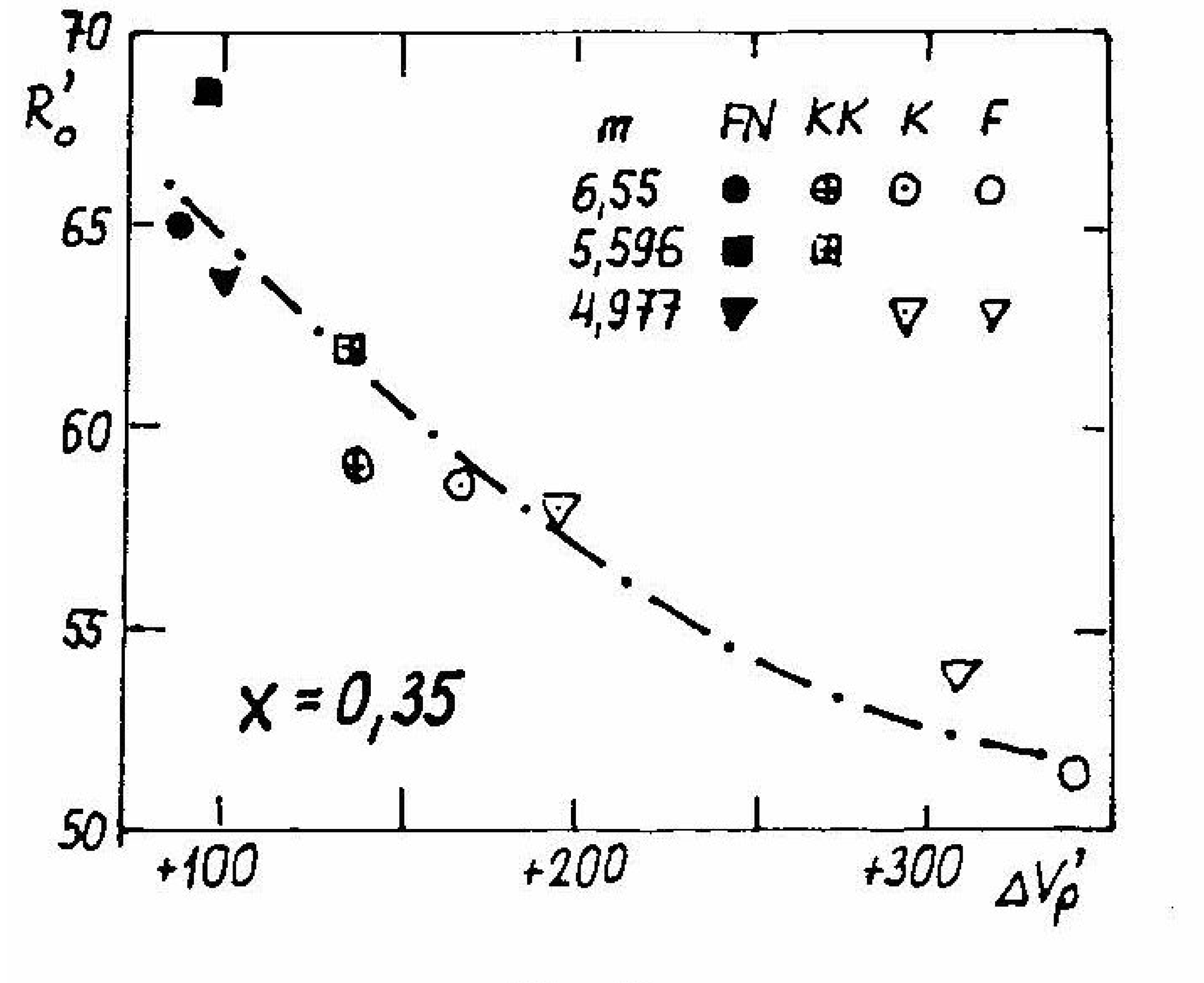
Az 5. táblázatban részletezett vizsgálatokban m_{c2} értékeit, ill. az ehhez tartozó víztartalmakat és víz-cement tényezőket a mellékelt kimutatás részletezi. Összevetve ezeket az értékeket a fenti x_h értékekkel, az állapítható meg, hogy az m_{c2}-höz tartozó víz-cement tényezők és a számított x_h értékek eltérése csekély, mégpedig *FN* konzisztenciára *0,02*, *KK* konzisztenciára *0,03*, *K* konzisztenciára *0,04* és *F* konzisztenciára *0,07*.

Ebből arra lehet következtetni, hogy azokat a keverékeket lehet pépjellegűnek tekinteni, amelyek cementtartalma m_{c2}-nél nagyobb. Ez esetben ugyanis nyomószilárdságuk – adott víz-cement tényező mellett – megegyezik az ugyanolyan víz-cement tényezőjű tiszta cementpép nyomószilárdságával.

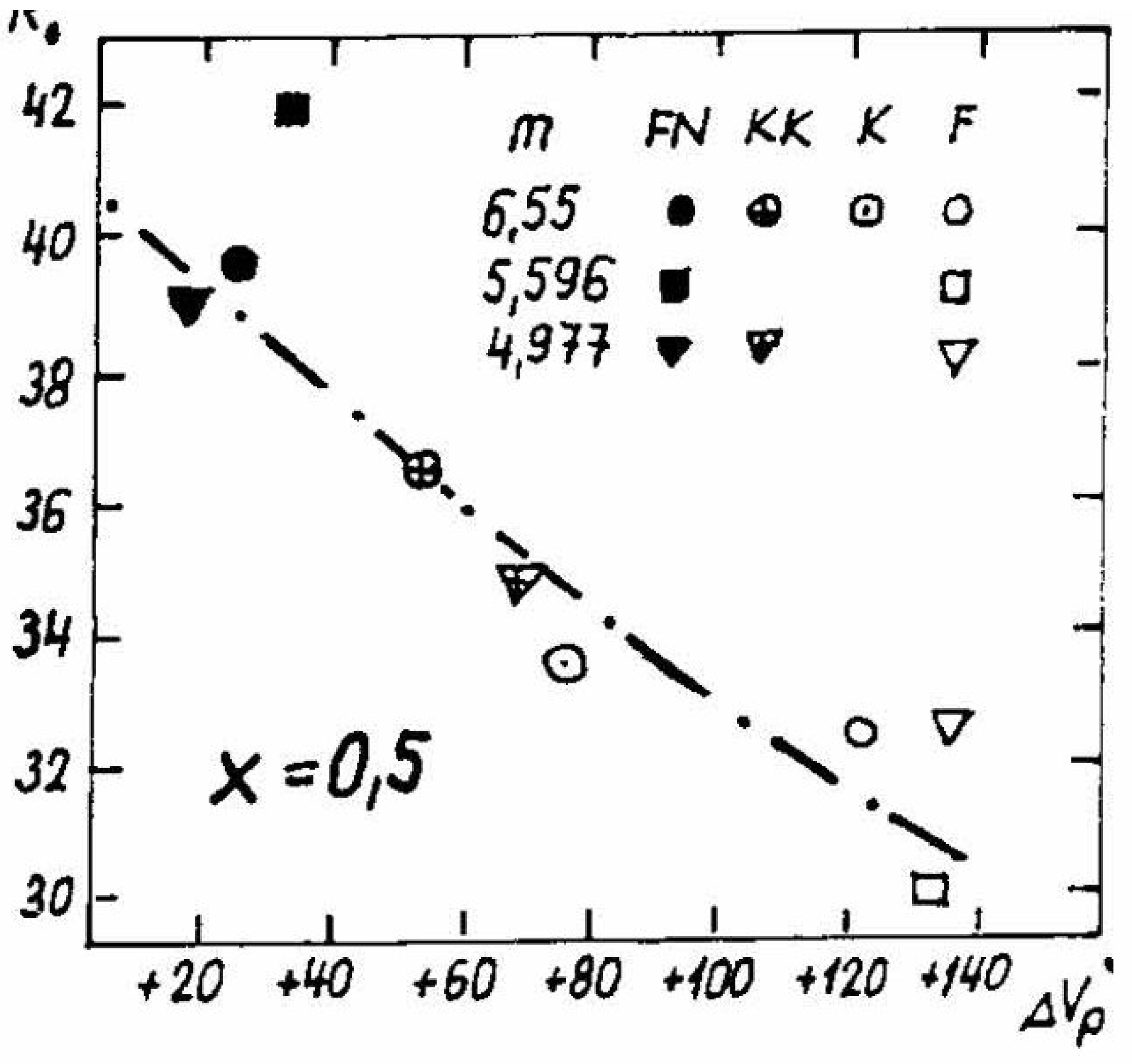
Kérdés maradt, hogy van-e fizikai magyarázata az x – R_o összefüggések konzisztenciától függő eltéréseinek. Ennek vizsgálatát a következő fejezet tartalmazza.

6.3.3. A péptartalom és a pépigény viszonyának a vizsgálata

Már korábbi vizsgálataim [31], [33]–[36] eredményei alapján megállapítottam, hogy változatlan víz-cement tényező mellett a cementpép tartalom fokozatos növelése kezdetben növeli, bizonyos cementpép tartalom elérése után csökkenti a beton nyomószilárdságát. ERNTROY és SHACKLOCK nagyszilárdságú betonok vizsgálata során [76] már 1954-ben kimutatták adott kis víz-cement tényező mellett a csökkenő cementtartalom szilárdságnövelő hatását. Részben ezek az adatok irányították rá a figyelmemet az adalékanyagok pépigényének a vizsgálatára [63], ill. a péptartalom–pépigény viszonyának az ellenőrzésére. A péptartalom hatását – 1988 évi vizsgálataim alapján – a 46.-47. ábrákon mutatom be x = *0,33* és x = *0,5* víz-cement tényező mellett.

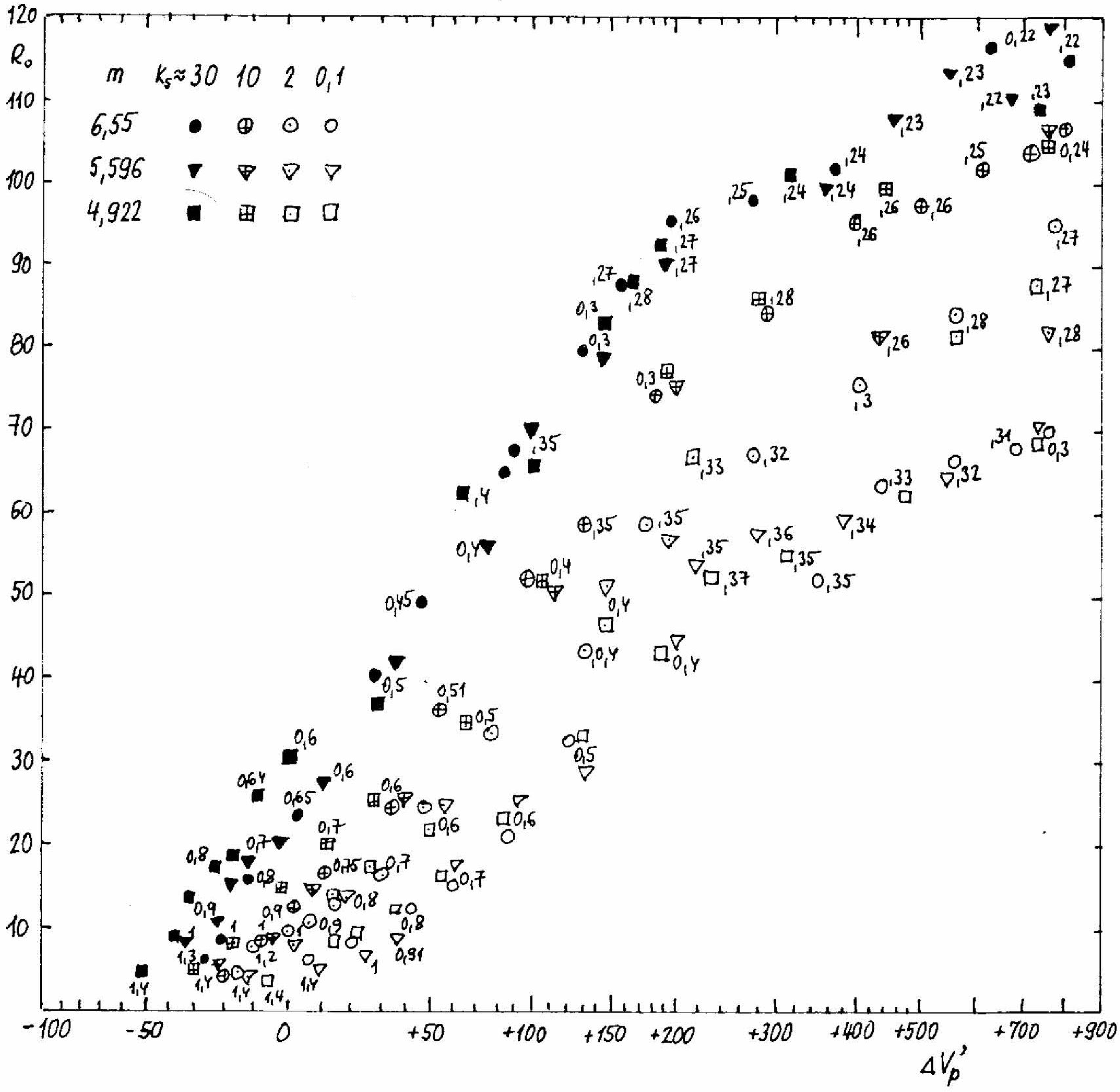


46. ábra



47. ábra

Az ábrákon a nyomószilárdságot a (7)-ből számított pépkülönbségek függvényében tüntettem fel, a pépigényt a 4.3. fejezetben megadott (64)-(65)-ből számítottam. Ezek az ábrák is bizonyítják korábbi megállapításomat: változatlan víz-cement tényező mellett a túltelített betonok tartományában a péptartalom növelése csökkenti a nyomószilárdságot.



48. ábra

Az 1988 évi vizsgálataim valamennyi kiértékelt adatát a 48. ábra foglalja össze; az áttekinthetőség érdekében a vizsgálatok egyes eredményeit jelző pontok mellé a víz-cement tényezők értékeit is feltüntettem, továbbá a különböző konzisztenciájú keverékek adatait eltérően jelöltem. A $\Delta V'_p - R_o$ összefüggését a vizsgálati eredmények szerint elsősorban a konzisztencia befolyásolja, a finomsági modulusnak kisebb a hatása, ha az adalékanyag szemeloszlása azonosan folytonos.

Korábbi, gyakorlati tartományba eső betonkeverékekkel ($m_c = 130 - 500\ kg/m^3$) végzett vizsgálataim során is hasonló összefüggést kaptam [58], és ennek alapján határoztam meg az ún. módosított víz-cement tényezőt, amelyek értelmezése a következő:

Adott víz-cement tényező mellett a telített ($V'_p = V_{po}$) és jól tömörített ($V_{lb} = V_l = 0$) levegőmentesen bedolgozott betonnal lehet elérni a legnagyobb nyomószilárdságot. Ha a beton telítetlen, vagy túltelített, akkor változatlan víz-cement tényező mellett nyomószilárdsága csökken. Ha $V_{lb} > 0$, akkor ugyancsak csökken a változatlan keverési arányú beton nyomószilárdsága. A $0 > \Delta V'_p > 0$ és a $V_{lb} > 0$ hatása tehát olyan, mintha az eredeti x víz-cement tényezője valamely $x' > x$ értékűre növekedett volna.

A módosított víz-cement tényező számítására az alábbi képleteket ajánlottam:

$V'_p \leq V_{po}$ mellett:
$$x' = x.\left(1 + \frac{V_{po} - V'_p}{V_{po}} + \frac{V_{lb}}{x.V_p}\right) \tag{99}$$

$V'_p \geq V_{po}$ mellett:
$$x' = x.\left(1 + \frac{V'_p - V_{po}}{V'_p} + \frac{V_{lb}}{x.V_p}\right) \tag{100}$$

Megjegyzem, hogy a beton nyomószilárdságát befolyásoló tényezők hatásának a víz-cement tényező módosításával való figyelembe vételét először NEWMAN és TEXCHENNÉ javasolták [77], akik a száraz alkotók (cement és adalékanyag) $S\ cm^2/g$ fajlagos felülete és az n adalékanyag:cement arány hatását

$$y = x - A.n + B.S \tag{101}$$

összefüggéssel fejezték ki, ahol y a módosított víz-cement tényező, továbbá $A \sim 0{,}02$ és $B \sim 0{,}0005$, az adalékanyag fajtájától és szemalakjától függően. Könnyen belátható, hogy S a pépigénnyel és n a péptartalommal arányos, elveiben tehát a (101) függvény hasonló a (99)-(100) függvényekhez. Az is belátható ugyanakkor, hogy az S és a V_{po} csak azonosan folytonos szemeloszlású, de különböző legnagyobb szemnagyságú adalékanyagok használatakor van trendkapcsolatban, mert a legkisebb fajlagos felülete a homokszegény (pl. egyszemcsés) halmaznak van (lásd a 26. ábrát), viszont a (64)-(65) szerint ennek legnagyobb a pépigénye. A pépigény tehát a fajlagos felületnél pontosabban írja le az adalékanyag hatását a nyomószilárdságra.

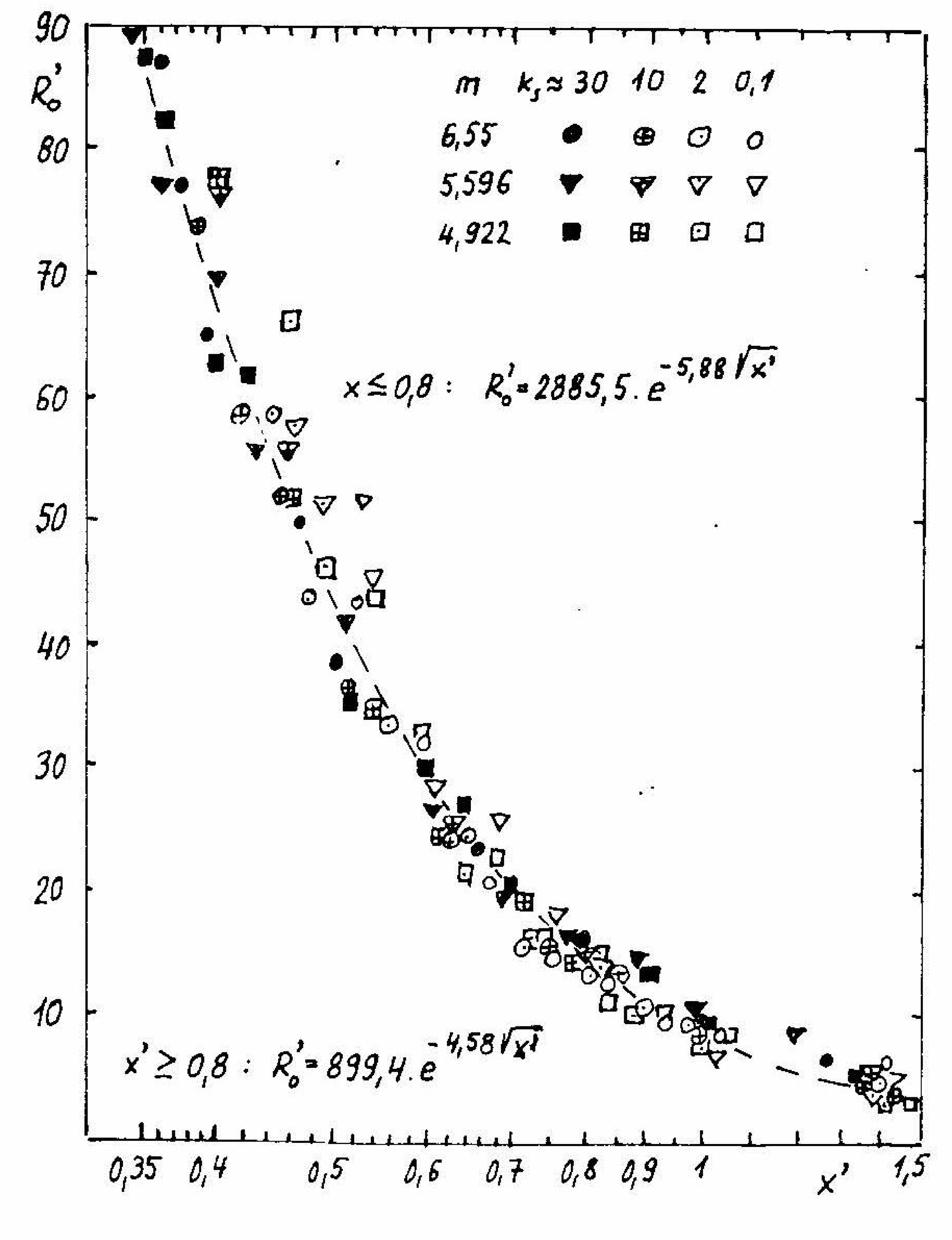
Az 5.2. fejezetben ismertetett értékelésem azt mutatta, hogy a $V_{lb} > 0$ levegőtartalom hatását a (89)-(90) pontosabban értelmezi, mint a (99)-(100) második tagja. Erre a tényre – vizsgálati eredményeimet elemezve – POPOVICS már korábban felhívta a figyelmemet [78]. Megjegyzendő továbbá, hogy a péptartalom és a pépigény viszonya csak a túltelített betonok nyomószilárdságát szabályozza, mert a telítetlen betonban a péphiányt a $V_l = V_{po} - V'_p$ egyértelműen kifejezi, ezért hatása a (87)-(90) függvényekkel követhető. Ebből viszont az következik, hogy a módosított víz-cement tényezőt csak a túltelített betonokra kell értelmezni, mert telítetlen betonokra $x' = x$ és a péphiány hatását a (88) egyenlettel kell figyelembe venni.

A fentiek alapján a módosított víz-cement tényező számítására – azaz a péptöbblet hatásának a meghatározására – az alábbi kifejezést javasolom:

$$x' = x \times \frac{V_{ao}}{V'_a} \tag{102}$$

mert egyrészt a $V_{ao} : V'_a$ arány a péptöbbletet a $(V'_p - V_{po}) : V'_p$ aránnyal azonos módon fejezi ki, másrészt a telítetlen betonokban $V_{ao} = V'_a$, ezért nem szükséges két egyenlet a módosított víz-cement tényező számításához.

Az 5. táblázatban összefoglalt vizsgálati adataimra x' értékeit a (102) összefüggésből számítottam ki és az $x - R'_o$ függvénygörbét a 49. ábrán mutatom be.



49. ábra

Az ábra szerinti ponthalmazra $x' \le 0,8$ mellett

$$R'_o = 2885,5 \times e^{-5,88 \times \sqrt{x'}} \tag{103}$$

és $x' \ge 0,5$ mellett:

$$R'_o = 899,4 \times e^{-4,58 \times \sqrt{x'}} \tag{104}$$

függvények illeszkednek és a jól tömörített, telítetlen beton nyomószilárdsága:

$$R_o = R'_o \times e^{-0,035 \times \left(0,1 \times V'_p\right)^{1,3}} \tag{105}$$

függvényből számítható.

A (103)–(104) egyenleteket úgy tekinthetjük, mint az adott adalékanyaggal és cementtel elérhető legnagyobb nyomószilárdságok $x - R'_o$ függvényeit. Megjegyzem, hogy az ismertetett vizsgálataim során az $x \sim 0,8$ víz-cement tényezőjű keverékek váltak telítetté, valószínűleg ezért különül el ennek a pontnak a környezetében az $x - R'_o$ összefüggés.

Az 5. táblázat eredményeiből szerkesztettem meg az 50. ábrát, amely az 1988 évi vizsgálataimra illeszkedve adja meg a váci 350 kspc 20 cementtel (R_c = *42,3 MPa*) készített keverékek teljes tartományában a nyomószilárdságnak a péptartalomtól, a konzisztenciától és a víz-cement tényezőtől függő változását. Az 50. ábrát az eddig ismertetett összefüggések alapján a következőképpen lehet megszerkeszteni.

A telített, jól tömörített betonokra $x' = x$, mert $V'_a = V_{ao}$, a nyomószilárdságok a (03) – (104)-ből számíthatók, amelyekhez tartozó víz-cement tényezőket lehet feltüntetni a $V'_p = 0$ függőlegesén. Az adott cementtel – különböző víz-cement tényezők mellett – ezek az elérhető legnagyobb nyomószilárdságok.

A tiszta cementpép nyomószilárdsága a 6.2. fejezetben közölt (93)-ból számítható; a különböző nyomószilárdságokhoz tartozó x_p értékek láthatók a V'_p = *900 liter/m*^{3}-hez húzott függőleges egyenesen. Gyakorlati megjegyzés: a péptöbblet legnagyobb értéke 840-860 liter/m^3 lehet, ezért lehetséges az ábrát V'_p = *900 liter/m*^{3}-nél lezárni.

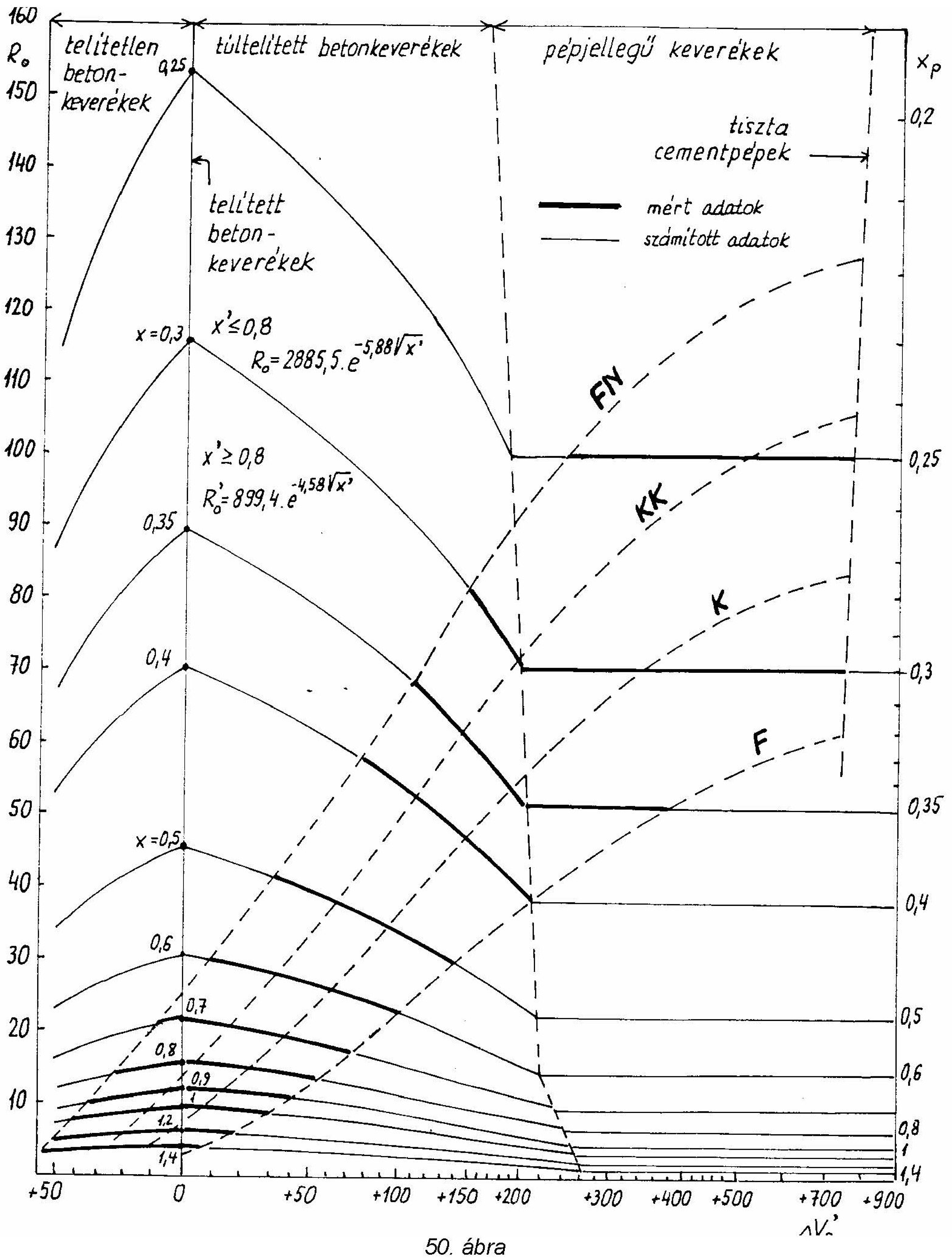
A 45. ábra kapcsán megállapítottam, hogy a nagy cementtartalmú betonkeverékek nyomószilárdsága az azonos víz-cement tényezőjű pépek nyomószilárdságával egyenlő, függetlenül a péptartalomtól. Ezért a nagy cementtartalmú pépek nyomószilárdságát az x_p értékekből húzott vízszintes vonalak jellemzik.

Első közelítésben azt tételeztem fel, hogy az adott x mellett a (93)-ból számítható nyomószilárdság azokra a betonokra érvényes, amelyek cementtartalma $m_c \ge m_{c2}$. Az 50. ábra alapján ezt a megállapítást pontosítani kell: amíg $x \le 0,7$, addig $V'_p \approx$ *200 liter/m*^{3}-től a keverék nyomószilárdsága a (93)-ból számítható, ettől kezdve a betonkeverékek ugyanis pépjellegűek, $x > 0,7$ mellett pedig ez a péptöbblet-határ fokozatosan nő $\Delta V'_p \approx$ *260 liter/m*^{3}-ig. A pépjellegű keverékek nyomószilárdságát kizárólag a cementkőváz szilárdsága határozza meg.

Ha $\Delta V'_p <$ *200-260 liter/m*^{3}, akkor a betonkeverék nyomószilárdsága adott víz-cement tényező mellett annál nagyobb, minél kisebb a péptartalom-különbség. A péptartalom csökkenésével tehát a nyomószilárdság addig növekszik, amíg a beton telítetté nem válik. Ezt mutatják az 50. ábrán a péptöbblet-határok függőlegesének és a pépszilárdságok vízszintesének a metszéspontjaiból induló emelkedő görbék, amelyek csúcspontjai $\Delta V'_p$ függőlegesében vannak. A görbék a (102)-ből számítható x'-re illeszkednek a (103)-(104) szerint. A túltelített betonkeverékek nyomószilárdságát a cementkőváz és az adalékanyag kölcsönhatása határozza meg.

Ha $\Delta V'_p < 0$, akkor a jól tömörített betonok is tartalmaznak $V_l = |\Delta V_p|$ *liter/m*^{3} térfogatú levegőt s ennek következtében az adott víz-cement tényezőhöz tartozó legnagyobb nyomószilárdsághoz ké-

pest csak a (105)-ből számítható nyomószilárdság érhető el. Ezt mutatják a telítetlen tartományban látható, kis víz-cement tényezők mellett meredekebben, nagyobb víz-cement tényezők mellett enyhébben csökkenő görbék.



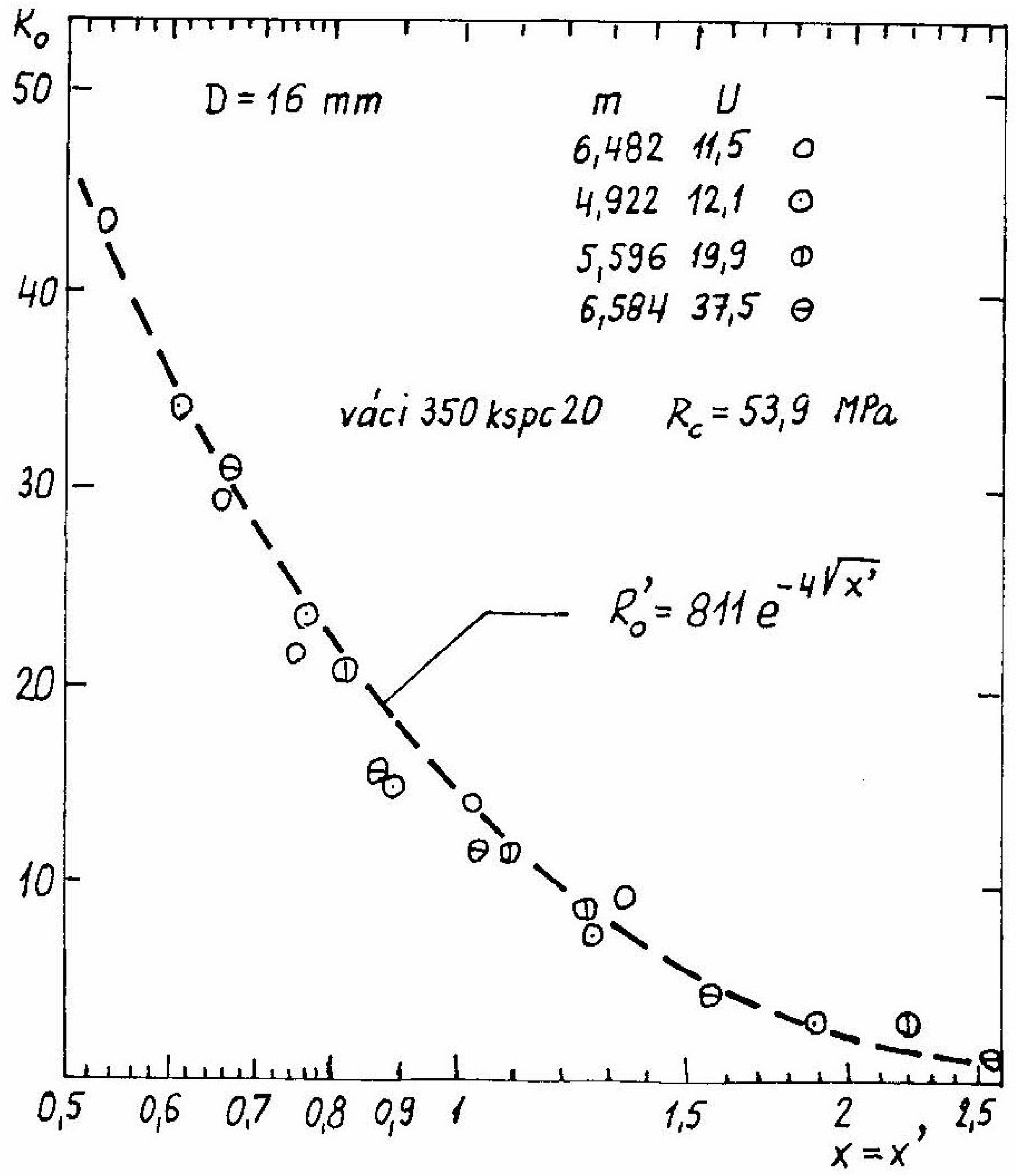
50. ábra

Az 50. ábra a konzisztenciának már a 44. ábrán bemutatott hatásáról is tájékoztat: a túltelített betonkeverékek tartományában az adott víz-cement tényező mellett a még bedolgozható legmerevebb keverékkel lehet a legnagyobb nyomószilárdságot elérni (mert a csökkenő vízadagolás csökkenti a péptöbbletet). A pépjellegű keverékek nyomószilárdságát – adott víz-cement tényező mellett –

a konzisztencia nem befolyásolja, míg a telítetlen betonkeverékek tartományában adott víz-cement tényező mellett a konzisztencia lágyulása javítja a nyomószilárdságot (mert növekvő vízadagolással növekszik a péptartalom és így csökken a péphiány).

Az 50. ábrán a konkrét vizsgálati eredményekre illeszkedő pontokat (lásd a 48. ábrát) vastag vonallal jelöltem, míg vékony vonallal a feltételezhető értékeket. A feltételezés jogosságát további vizsgálataim adatival támasztom alá a következő fejezetben.

6.3.4. Vizsgálatok az x – V_{po} – V'_p –R_o – konzisztencia összefüggések pontosítására



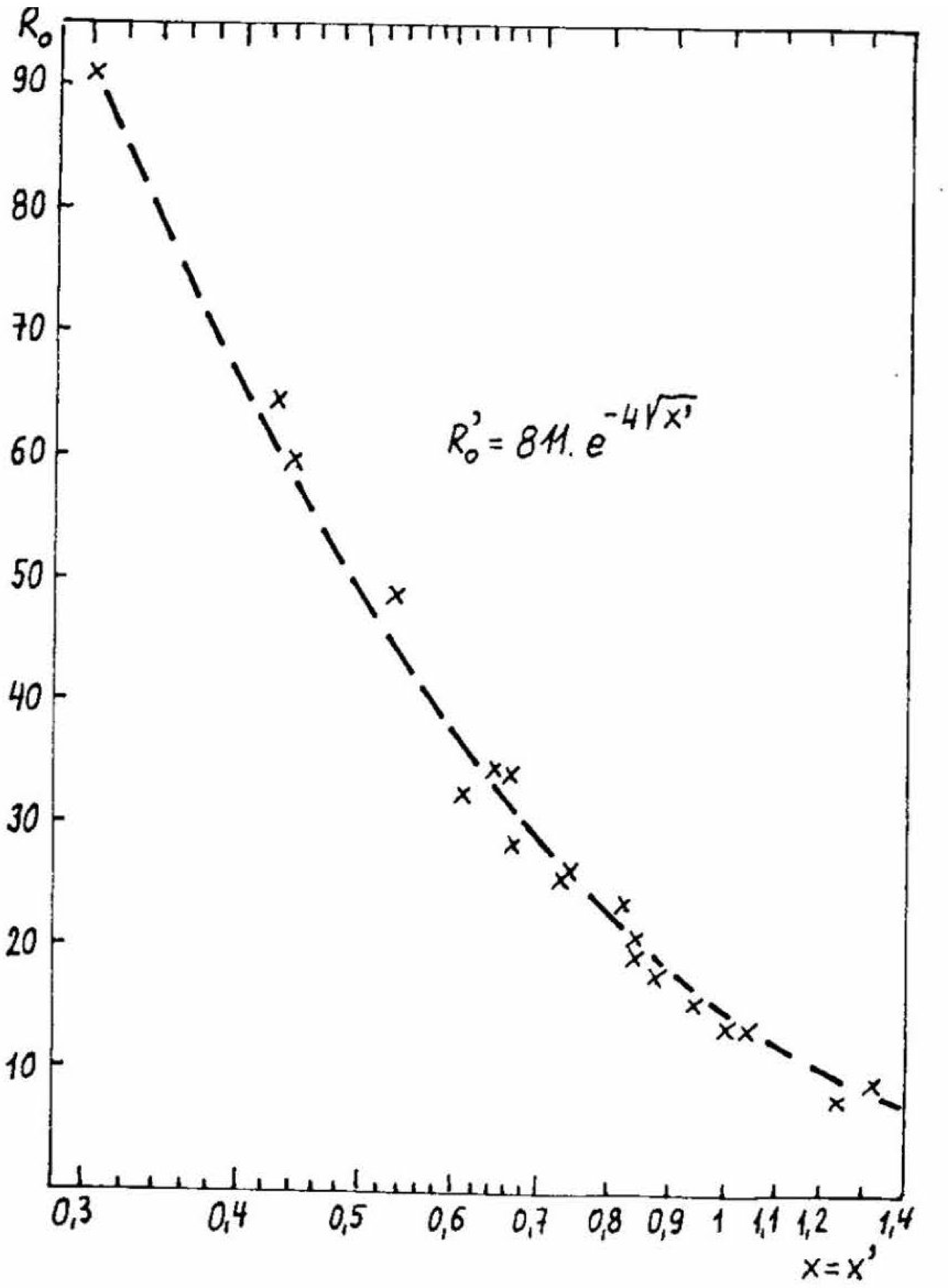
51. ábra

Az 50. ábrán vékony vonallal jelölt, feltételezett összefüggések helytálló voltát legújabb, 1989 évi vizsgálataimmal bizonyítottam. Mindenekelőtt négy különböző szemeloszlású adalékanyaggal és váci 350 kspc 20 cementtel (R_c = *53,9 MPa*) készítettem különböző konzisztenciájú, telített betonkeverékeket az $R_o = f[x=(x')]$ függvény meghatározására. A vizsgálati eredményeket a 6. táblázat és az 51. ábra foglalja össze. Az adatokra illeszkedő szilárdságbecslő függvény:

$$R_o = 811 \times e^{-4\times\sqrt{x'}} \qquad (106)$$

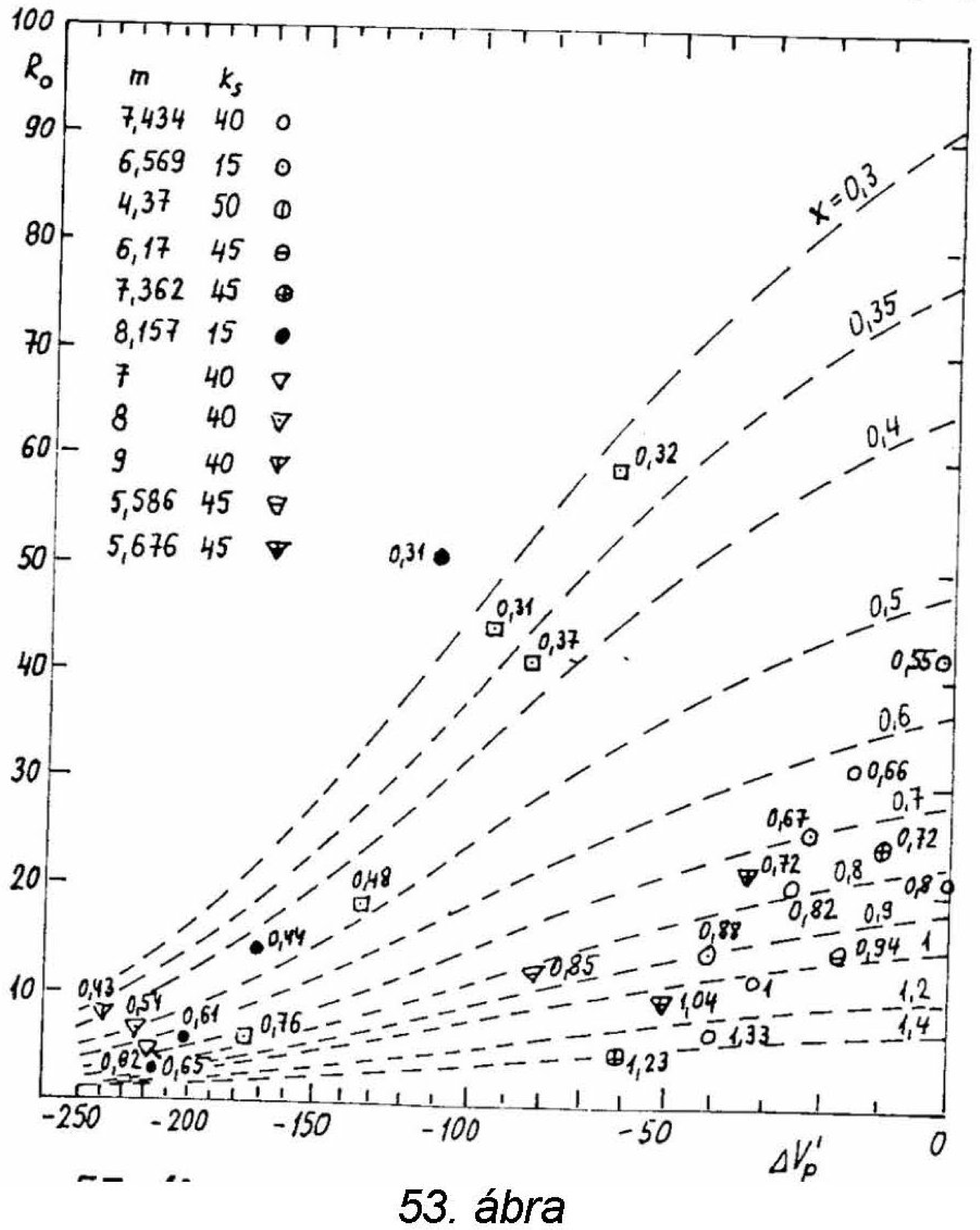
ahol $x' = x$, mert $\Delta V'_p = 0$.

Ezután széles határok között változó szemeloszlású dunai homokos kavics keverékekből készítettem különbözőképpen telített betonokat. Ezek vizsgálati eredményeit a 7. táblázatban foglaltam össze, ill. az adatokból az 52. ábrát szerkesztettem. Az 52. ábra igazolja, hogy a (106) függvény a szilárdságbecslésre jó összefüggést ad.



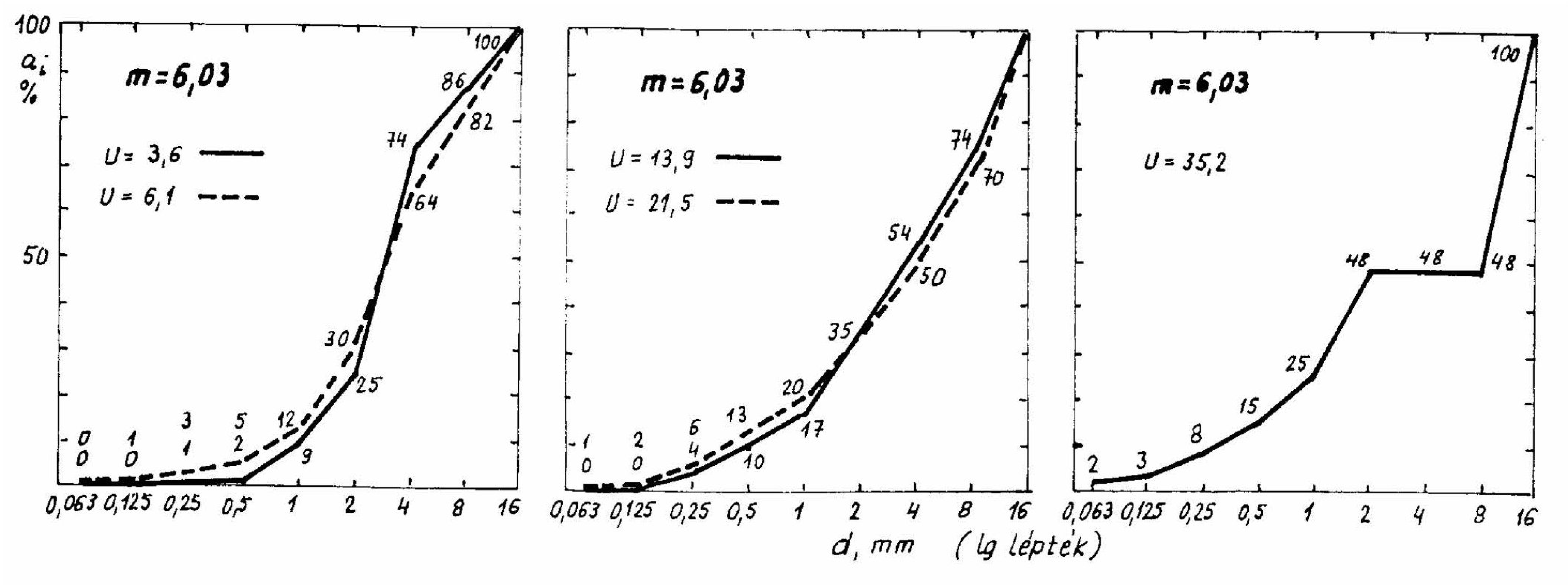
52. ábra

A 7. táblázat adataiból készítettem el az 50. ábra analógiájára az 53. ábrát, amely igazolja, hogy a (106) képlet, kiegészítve a (105)-tel alkalmas a telítetlen betonkeverékek nyomószilárdságának a becslésére is. Megjegyzem, hogy az 53. ábrán a jelek a tényleges vizsgálati eredményeket, a szaggatott vonalak a =106)-ből és a =105)-ből számított összefüggéseket adják meg.



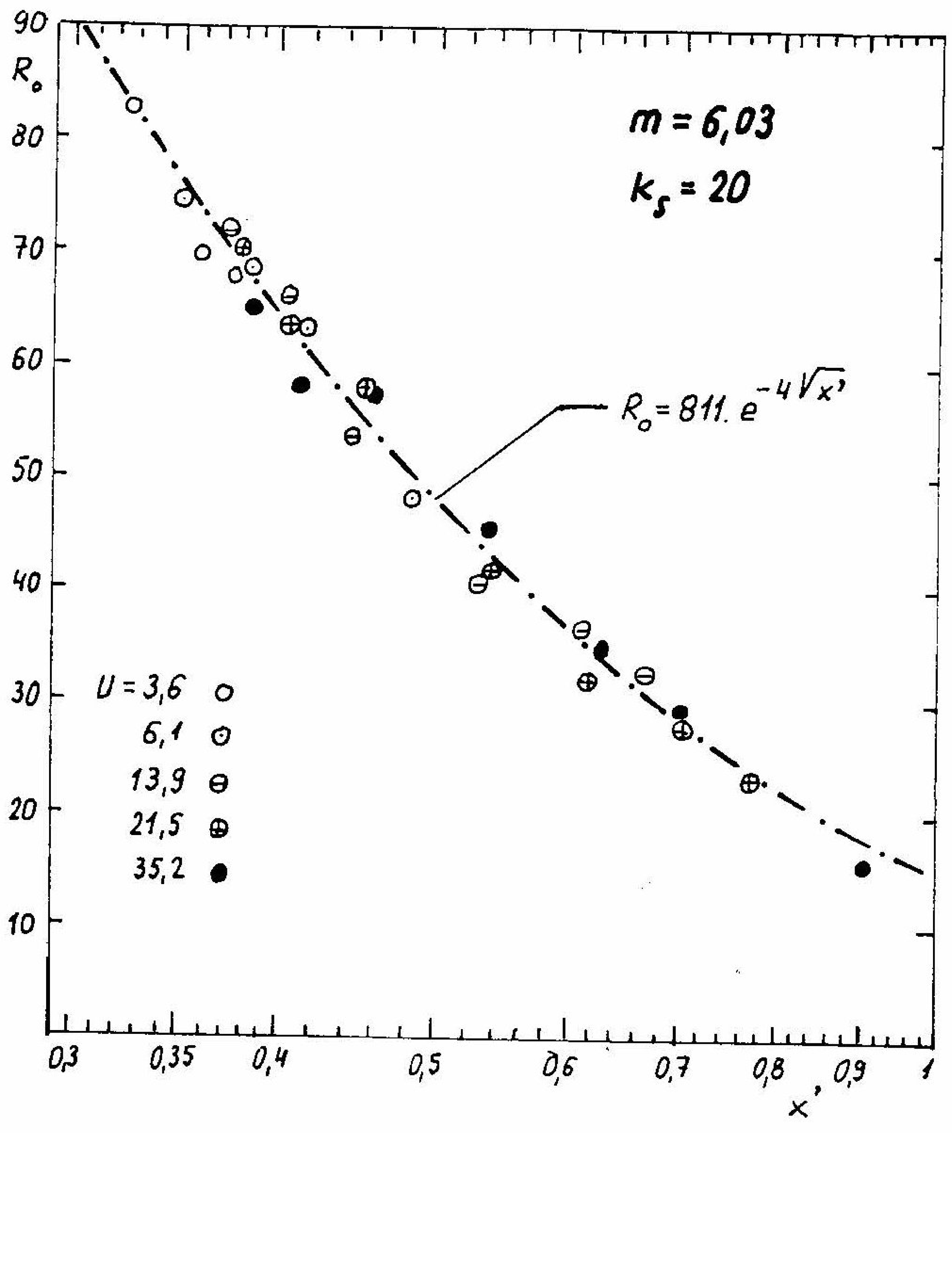
53. ábra

A túltelített betonok vizsgálatához változatlan finomsági modulusú, de eltérő egyenlőtlenségi együtthatójú szemeloszlásokat állítottam össze az 54. ábrámnak megfelelően.

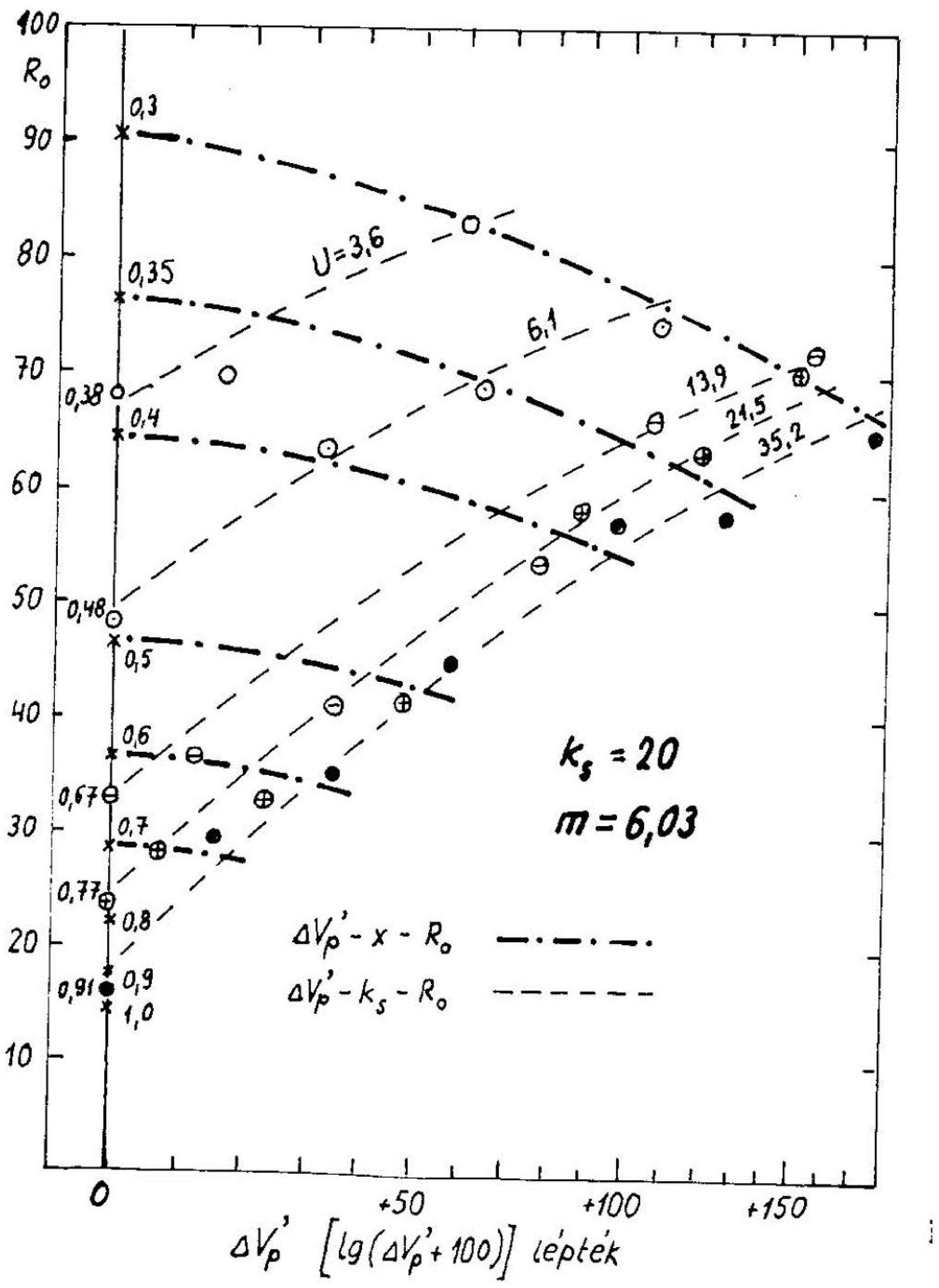


54. ábra

Az azonos konzisztenciájú (k_s ~ *20*) keverékek összetételt a $\Delta V'_p$ = *0*-hoz tartozó víz-cement tényezőkből kiindulva *x* = *0,3-0,7* értékek között változtattam. A nyomószilárdság 28 napos vizsgálati eredményeit a 8. táblázatban foglaltam össze. Az *x' – R_o* összefüggés az 55. ábrán, míg a $\Delta V'_p$ *– x – konzisztencia – R_o* összefüggés az 56. ábrán látható (az 56. ábra jelölései megegyeznek az 55. ábráéval). Az ábrák igazolják, hogy az adatok az 50. ábrán feltételezett összefüggések szerint rendeződnek.



55. ábra



56. ábra

Az 50., 53. és 56.ábrák alapján megállapítható, hogy változatlan vízigényű adalékanyagot felhasználva

- a nagy cementtartalmú betonok nyomószilárdsága kis egyenlőtlenségi együttható,
- a közepes cementtartalmú betonoké közepes egyenlőtlenségi együttható, és
- a kis cementtartalmú betonoké nagy egyenlőtlenségi együttható

mellett optimális. Ennek oka az adalékanyag graduáltságának és a keverék cementtartalmának a kölcsönhatása, ahogyan erre PALOTÁS [22] már korábban rámutatott, amikor tervezési eljárásában módszert adott a változó cementtartalmú keverékekhez illeszkedő optimális finomsági modulusnak a számítására.

Az U egyenlőtlenségi együttható a szemcsés halmazok szemeloszlási görbéinek alakját, azaz graduáltságát fejezi ki. Ha azonos graduáltságú, de eltérő finomsági modulusú adalékanyaggal készített azonos konzisztenciájú betonkeverékek $\Delta V'_p - x - konzisztencia - R_o$ összefüggését vizsgáljuk, azt találjuk, hogy az azonos víz-cement tényezőjű betonok nyomószilárdsága gyakorlatilag változatlan, mert $\Delta V'_p$ értéke is gyakorlatilag állandó. Ennek az a magyarázata, hogy a finomsági modulus csökkenésével növekszik ugyan V_{po} értéke, de növekszik az adalékanyag w_a vízigénye is, ezért változatlan x elérésére a cementtartalmat is növelni kell. A péptartalom növekménye arányos a pépigény növekményével. Példaképpen 1988 évi vizsgálataim eredményeiből a $k_s \sim 10$ víztartó képességű és $x = 0,4$ víz-cement tényezőjű keverékek három vizsgálati adatát mutatom be az alábbi táblázatban:

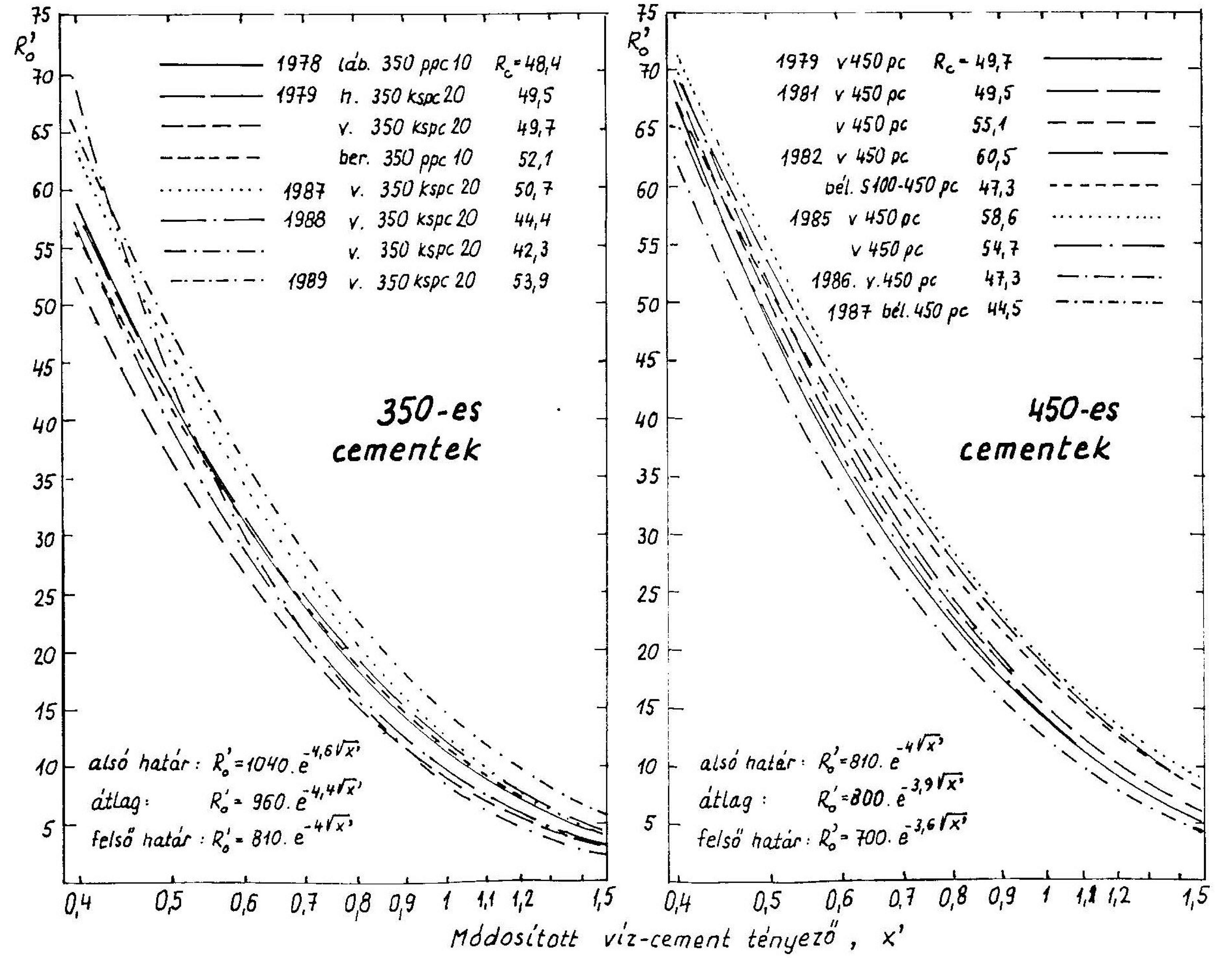
m	U	m'_c	m'_w	m'_a	x	V'_p	R_o
6,55	21,4	405	162	1867	0,4	+96	49,1
5,596	19,9	464	186	1758	0,4	+110	51,7
4,922	12,1	498	199	1690	0,4	+105	51

A beton nyomószilárdságának előbecslése, ill. összetételének a tervezése dolgozatom 3.–6. fejezeteiben részletezett vizsgálataim eredményei és azok elemzése alapján kidolgozott összefüggések segítségével alakítható ki. A következő fejezetben a tervezési módszert és annak algoritmusait foglalom össze.

7. MÓDSZER A BETON VÁRHATÓ NYOMÓSZILÁRDSÁGÁNAK BECSLÉSÉRE ÉS ÖSSZETÉTELÉNEK TERVEZÉSÉRE

7.1. A nyomószilárdság becslése

A beton várható nyomószilárdságát a (102)-ből számított víz-cement tényező, valamint a cementfajtától függő állandókból képzett ABRAMS ($x'^{0,5}$) függvény ismeretében lehet becsülni. Az állandók meghatározása érdekében feldolgoztam az 1978–1989 között végzett valamennyi laboratóriumi vizsgálatom adatait és meghatároztam az $x' - R'_o$ összefüggéseket, amelyek a 350-es és a 450-es cementekre különválasztva az 57. ábrán láthatók.



57. ábra

Az ábrából megállapítottam az alsó és felső határgörbék, ill. az átlagot jellemző görbék ABRAMS ($x'^{0,5}$) függvényeit, ezek a következők:

350-es cement, alsó határ : $$R'_o = 1040 \times e^{-4,6\sqrt{x'}} \qquad (107)$$

átlag : $$R'_o = 960 \times e^{-4,4\sqrt{x'}} \qquad (108)$$

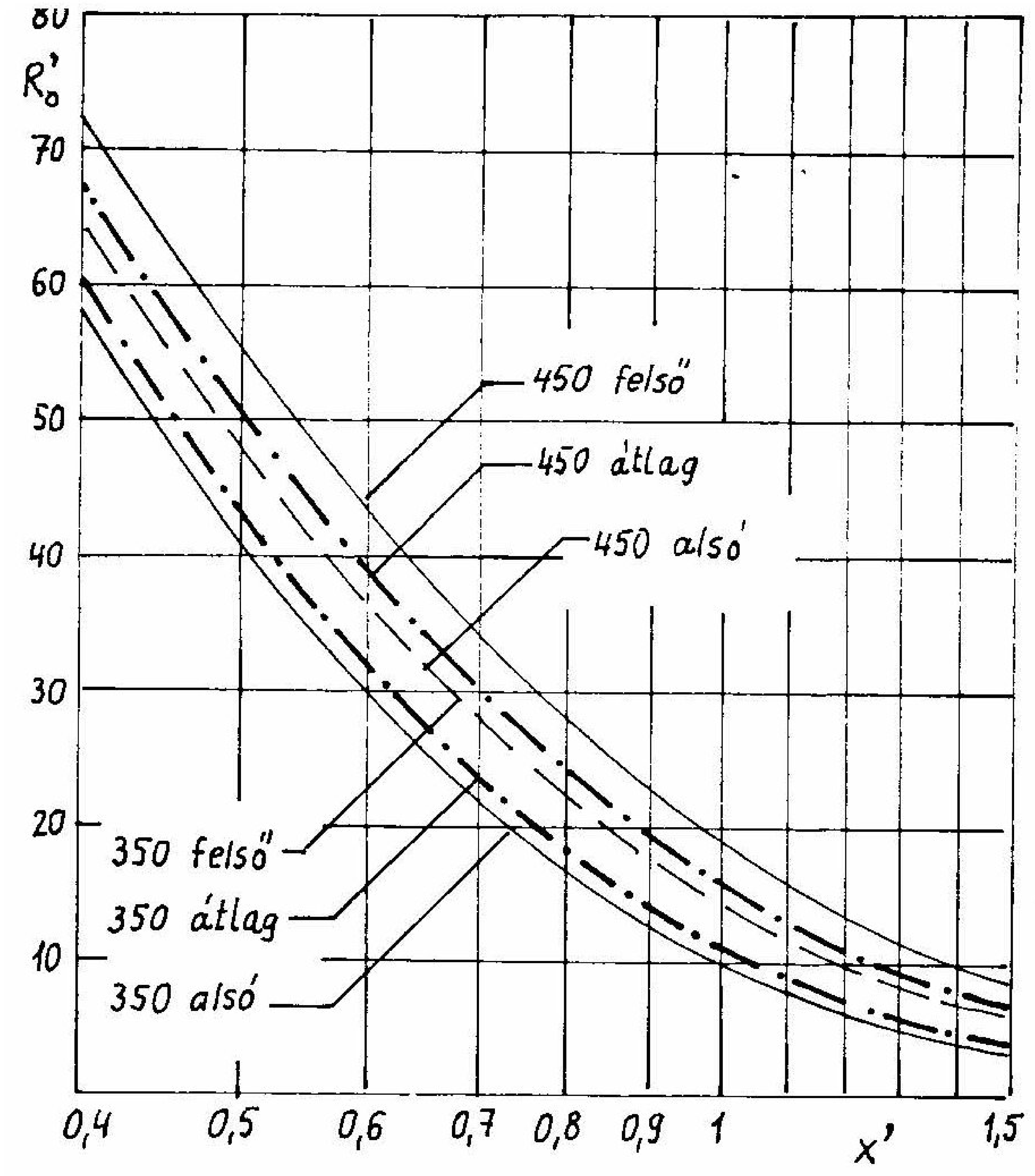
felső határ : $$R'_o = 810 \times e^{-4\sqrt{x'}} \qquad (109)$$

450-es cement, alsó határ : $$R'_o = 810 \times e^{-4\sqrt{x'}} \qquad (110)$$

átlag : $$R'_o = 800 \times e^{-3,9\sqrt{x'}} \qquad (111)$$

felső határ : $$R'_o = 700 \times e^{-3,6\sqrt{x'}} \qquad (112)$$

Ezek az összefüggések az 58. ábrán szemlélhetők.

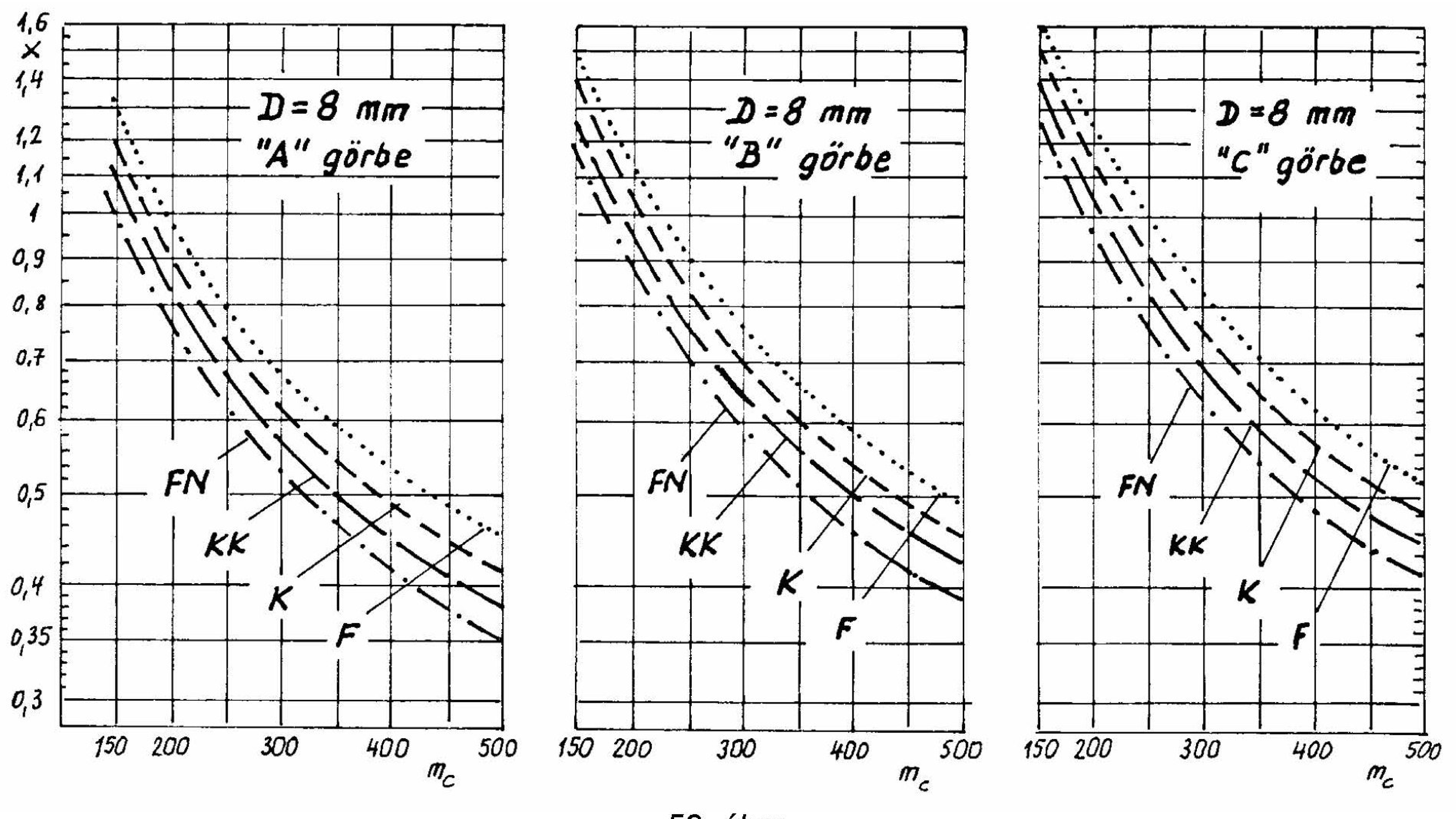


58. ábra

A módosított víz-cement tényező számításához ismerni kell

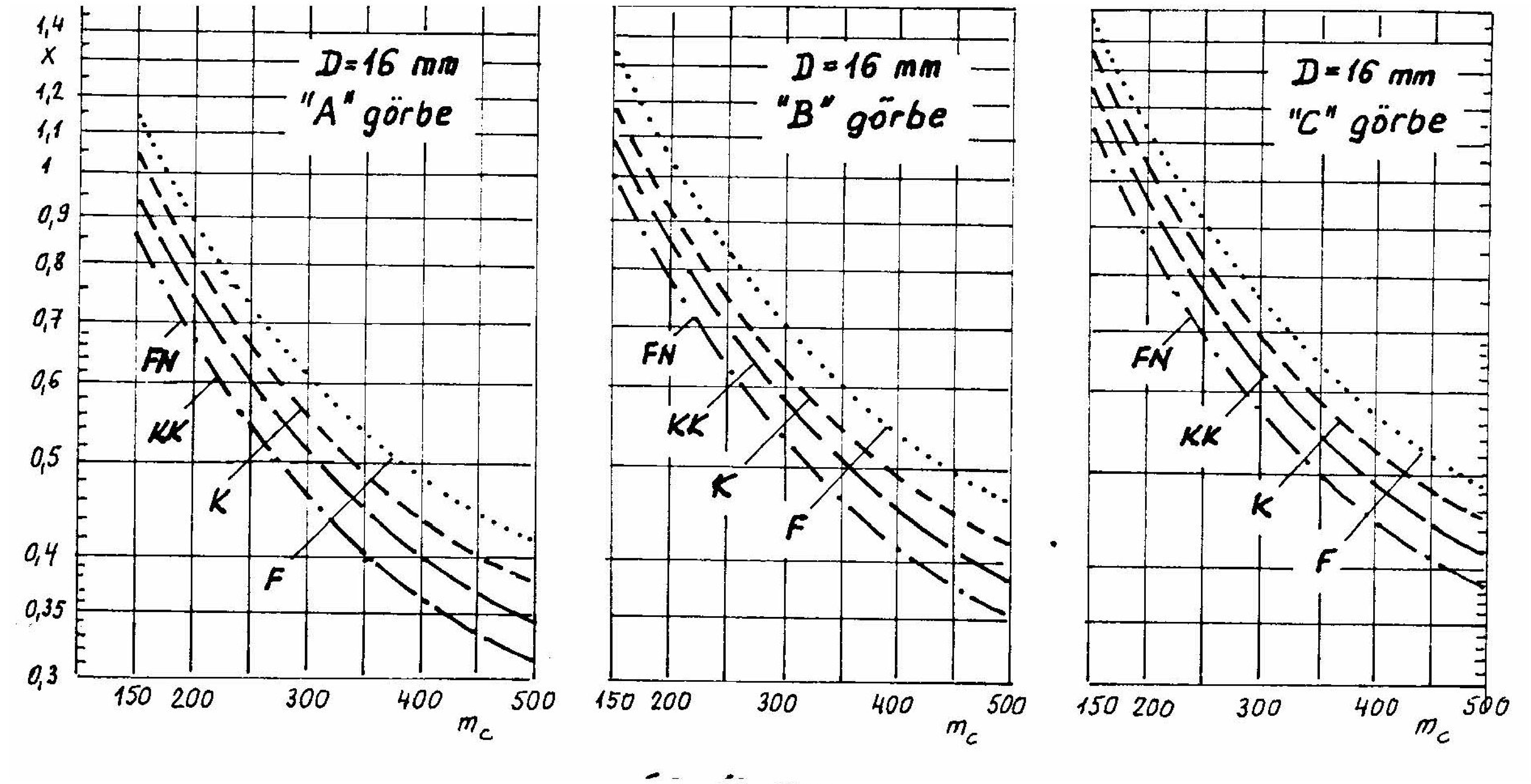
- a beton összetételét (cement-, víz- és adalékanyag-tartalmát, beleértve a víz-cement tényezőt) a V'_p, ill. a V'_a pép-, ill. adalékanyag-térfogat meghatározása érdekében,
- az adalékanyag szemeloszlását (finomsági modulus és egyenlőtlenségi együttható), valamint a betonkeverék konzisztenciáját a V_{po} pépigény, ill. a V_{ao} mértékadó adalékanyag-térfogat meghatározása érdekében,
- a bedolgozott friss beton testsűrűségét a V_l, ill. V_{lb} levegőtartalom meghatározása érdekében,
- a cement fajtáját az alkalmazható ABRAMS ($\sqrt{x'}$) függvény kiválasztása érdekében.

A gyakorlatban sokszor nincs lehetőség arra, hogy a módosított víz-cement tényező szabatos meghatározásához szükséges valamennyi fent felsorolt jellemző pontos értékét felderítsük. A megszilárdult beton készítési adatai közül az utólagos vizsgálat során sokszor csak a felhasznált cement fajtáját és közelítő mennyiségét, az alkalmazott adalékanyag legnagyobb szemnagyságát és közelítő szemeloszlását, valamint a keverék konzisztenciáját lehet megállapítani. Vizsgálati eredményeim birtokában szerkesztettem meg a várható nyomószilárdság közelítő becslésére a következő ábrákat.

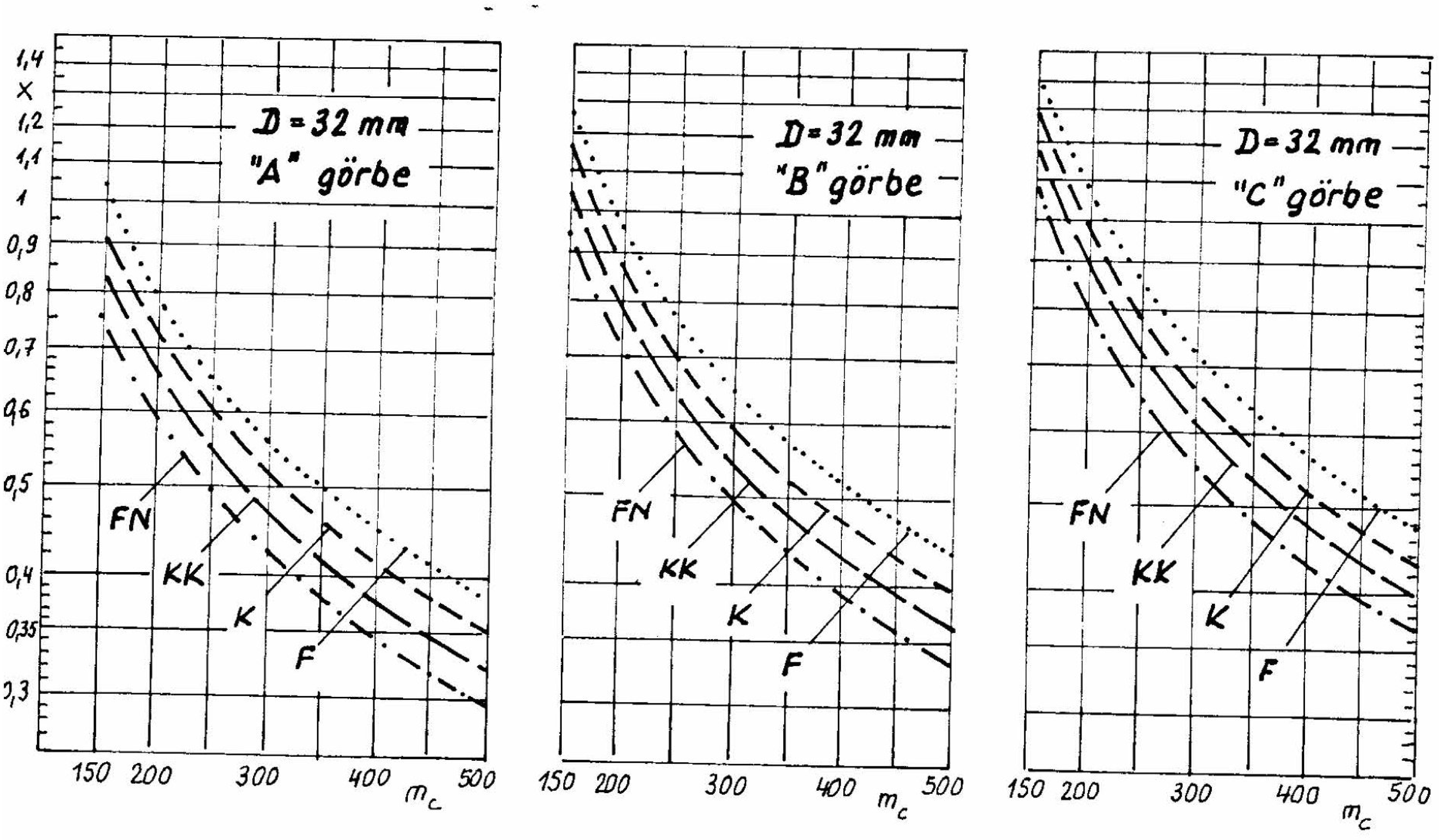


59. ábra

Az 59. ábráról a *D = 8 mm* legnagyobb szemnagyságú, az *MI 04.19* irányelvek *A, B* és *C* határgörbéinek megfelelő szemeloszlású, legfeljebb 3 térfogat % agyag-iszapot tartalmazó homokos kaviccsal készíthető, m_c = *150–500 kg/m*^{3} cementtartalmú betonok *FN-F* konzisztenciához szükséges víz-cement tényezői olvashatók le. A 60. ábra a *D = 16 mm-es*, a 61. ábra a *D = 32 mm-es* homokos kaviccsal készített betonokra adja meg ugyanezeket az adatokat. A víz-cement tényezők várható értékei ezeknek az ábráknak a segítségével becsülhetők.



60. ábra



61. ábra

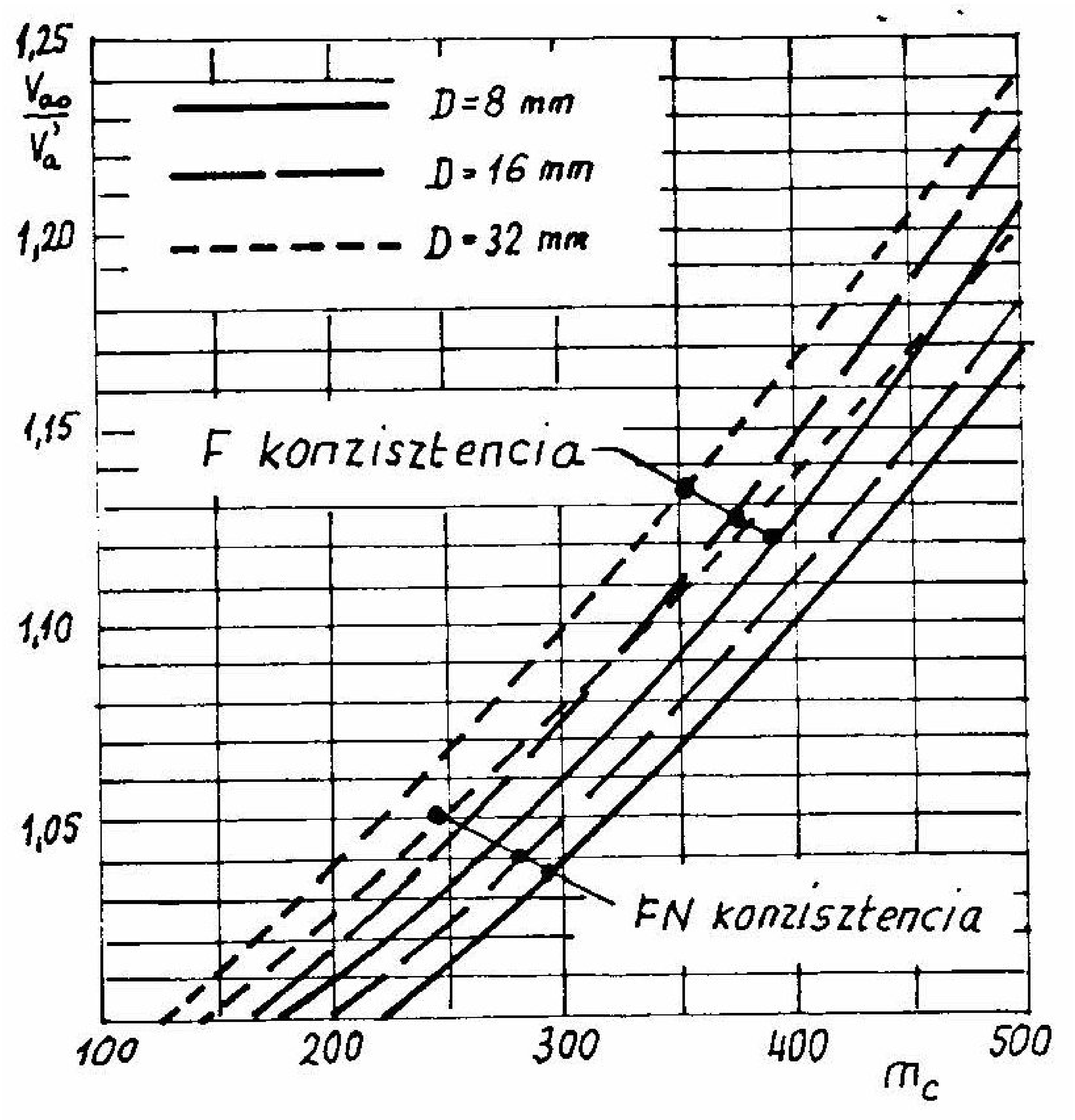
Ha az adalékanyag 0-4 mm-es homokfrakciójának agyag-iszap tartalma f > *3 térfogat %*, akkor w_{af} *tömegrész* vízigénye a (32)-ből számított w_a értékhez képest növelendő az alábbi összefüggésnek megfelelően:

$$W_{af} = w_a + A\,.\,(f-3) \qquad (113)$$

ahol *A* értéke	*FN* konzisztenciára:	0,001
	KK konzisztenciára:	0,0015
	K konzisztenciára:	0,002
	F konzisztenciára	0,0025

Ebből következik, hogy f > *3 térfogat %* agyag-iszap tartalmú adalékanyag felhasználásakor (m_{ao} ~ *2000 kg/m*^{3} átlagos adalékanyag-tömeget alapul véve) a 3 térfogat % felett minden többlet % agyag-iszap a betonkeverék vízszükségletét *FN, KK, K* és *F* konzisztencia mellett rendre kb. *2, 3, 4* és *5* liter/m^3-rel növeli. Ennek megfelelően az 59.–61. ábrákról leolvasható víz-cement tényezőkhöz

m_c = *150 kg/m*^{3} mellett rendre *(f-3)×0,013; (f-3)×0,02; (f-3)×0,027* és *(f-3)×0,033*, míg m_c = *500 kg/m*^{3} mellett ugyanebben a sorrendben *(f-3)×0,004; (f-3)×0,006; (f-3)×0,008* és *(f-3)×0,01* értéket kell hozzáadni.



62. ábra

A víz-cement tényezőt a (102) szerint $V_{ao}:V'_a$ aránnyal kell módosítani, amelynek jó közelítést adó értékeit a 62. ábráról lehet leolvasni. Az ábra az *MI-04.19* szerinti határgörbéknek megfelelő folyamatos szemeloszlású homokos kaviccsal készített *FN* és *F* konzisztenciájú, m_c = *100-500 kg/m*^{3} cementtartalmú betonokhoz tartozó $V_{ao}:V'_a$ értékeket mutatja. Ha az adalékanyag szemeloszlása lépcsős jellegű (nagy egyenlőtlenségi együtthatójú), akkor $V_{ao}:V'_a$ a 62. ábráról leolvashatónál 0,02-0,04 értékkel nagyobb, ha pedig homokszegény (kis egyenlőtlenségi együtthatójú), akkor 0,02-0,04 értékkel kisebb.

Ha a módosított víz-cement tényező számításához szükséges jellemzők ismeretesek, akkor

- az adalékanyag pépigénye a (64)–(65),
- a cementpép tényleges térfogata (V_p) a (4), ill. a hibátlanul tömörített beton V'_p péptartalma $V'_p<V_{po}$ mellett $$V'_p = \frac{V_{ao}}{V_a} \times V_p \text{ liter!m}^3 \qquad (114)$$

és $V'_p>V_{po}$ mellett $$V'_p = \frac{1000}{V_c + V_w + V_a} \times V_p \text{ liter/m}^3 \qquad (115)$$

- az *x* víz-cement tényező a (10),
- az adalékanyag V_{ao} legnagyobb bedolgozható térfogata az (5), (64) és (65),
- a jól tömörített betonban a V'_a adalékanyag térfogat

$V'_p < V_{po}$ mellett $$V'_a = V_{ao} \text{ liter/m}^3 \qquad (116)$$

$V'_p > V_{po}$ mellett $$V'_a = \frac{1000}{V_c + V_w + V_a} \times V_a \text{ liter/m}^3 \qquad (117)$$

- a betömörített friss beton V_l levegőtartalma a (6),
- az esetleges bedolgozási hiány miatti V_{lb} levegőtartalom a (8) vagy (9),
- az *x'* módosított víz-cement tényező a (102)

összefüggésekből számítható.

PÉLDA

A vizsgált beton *D = 16 mm-es* átlagos minőségű bányakavicsból, *350 kspc 20* cementtel, m_c ~ *350 kg!m*^{3} cementtartalommal s képlékeny konzisztenciával készült. A beton szemrevételezéssel kielégítő minőségűnek tűnik. A szilárdság becslésének a módja a következő.

A 60. ábra szerint az átlagos szemeloszlású adalékanyaghoz *„B”* görbe tartozik és a fenti adatoknak megfelelően *x ~ 0,54* víz-cement tényező. A bányakavicsban feltételezhető ***f = 6 térfogat %*** agyag-iszap, ezért a (13) szerint w_{af} kb. 3×0,002 = 0,006 értékkel nagyobb w_a-nál, következésképpen m_{ao} *=2000 kg/m*^{3}-t felvéve a többletvíz kb. 12 liter/m^3, tehát *x = 0,54* helyett *0,54 + (12/350) ~ 0,57* valószínű. Ha a betont túlvizezték, akkor *F* konzisztencia is elképzelhető, amelynek víz-cement tényezője a 60. ábra szerint *x = 0,6* és *f = 6 térfogat %* miatt célszerű *x = 0,63* értéket figyelembe venni.

A 62. ábra szerint a megadott adatokra *K* konzisztencia mellett V_{ao}/V'_a ~ *1,1* , míg *F* konzisztencia mellett ~ *1,12*. A módosított víz-cement tényező tehát *K* konzisztenciára *x' ~ 1,1 × 0,57~ 0,63* és *F* konzisztenciára *x' ~ 1,12 × 0,63 ~ 0,71.*

A várható nyomószilárdság a (107)–(109)–ből:

	K konzisztenciára	F konzisztenciára
alsó határ	27 MPa	22 MPa
átlag	29 MPa	24 MPa
felső határ	34 MPa	28 MPa

A példa szerinti beton nyomószilárdságának ingadozása a számítás szerint tehát 22–34 MPa értékűre becsülhető.

7.2. A beton összetételének a tervezése

A betonkeverék víz-cement tényezőjét és cementtartalmát, valamint a cement minőségét és az adalékszer fajtáját a szerkezet felhasználási területe határozza meg, következésképpen összetételének ki kell elégítenie bizonyos követelményeket. Ezeket az MSZ 4519, valamint a [79]-[80] foglalják össze. Néhány előírás példaképpen: a vasbeton szerkezetek betonanyagára $x < 0,7$; az *f100–f150* fagyállóságú, legalább 30 cm vastag szerkezetre $x \leq 0,45$ és légpórusképző adalékszer; a szulfátálló betonokra – az agresszivitás mértékétől függően – meghatározott cementfajta (pl. *S-54 350 pc*), $x \leq 0,5$ és $m_c \geq 300\ kg/m^3$ van előírva, továbbá meg van kötve a levegőtartalom megengedett legnagyobb és a vízzáróság megengedett legkisebb értéke.

A fentiekből következik, hogy az összetétel tervezésének első lépéseként tisztázni kell a betont érő valamennyi hatást s igénybevételt, a víz-cement tényező, a cementtartalom, a cementfajta és a tömörség ezekhez tartozó követelményeit, végül ki kell számítani a követelmények kielégítése mellett várható nyomószilárdságot a 7.1.fejezetben ismertetett módon.

A keverék tervezésére akkor van szükség, ha az x-re, az m_c-re, a cementfajtára, a levegőtartalomra, ill. a tömörségre nincs speciális, egyedi követelmény, vagy ha van, akkor ezeknek a követelményeknek a kielégítésével az előírt szilárdsági jelet nem lehet elérni. A beton összetételének a tervezése négy szakaszból áll:

- az alapanyag-jellemzők meghatározása vizsgálat és számítás útján,
- a betonkeverék konzisztenciájának a felvétele, az adott konzisztenciájú keverék alapjellemzőinek a számítása,
- a beton összetételének a számítása és végül
- a meghatározott összetételű betonok nyomószilárdságának a becslése,

Dolgozatom 3.-6. fejezeteiben részleteztem a számítás algoritmusait, amelyeket e fejezetben a fenti tervezési szakaszok sorrendjében foglalok össze.

Az alapanyag jellemzők közül a betonösszetétel tervezéséhez ismerni kell az adalékanyag finomsági modulusát és egyenlőtlenségi együtthatóját – ezeket a szemeloszlás részletes vizsgálatának az eredményeiből lehet kiszámítani – , továbbá a cement kötőerejét és fajlagos felületét, ezeket vagy vizsgálni kell az MSZ 523 szerint, vagy becsülni lehet a cement szilárdsági jele alapján.

Az *m* és az *U* segítségével lehet kiszámítani az adalékanyag pépigényét és vízigényét, az *S* segítségével lehet meghatározni a cement vízigényét és ebből a tiszta cementpép összetételét (cement- és víztartalmát). A számítás menetét az *1. tervezési séma* foglalja össze.

A betonkeverék konzisztenciáját – felhasználásának a helyétől és módjától függően – a [79] szerint kell felvenni. A konzisztencia függ a készítési feltételektől (a vasalás sűrűsége, a szerkezet geometriája, a szállítás és a tömörítés módja), ill. a különleges követelményektől (pl. kopásálló beton legfeljebb *KK* konzisztenciájú lehet).

A beton konzisztenciáját bármely konzisztencia-vizsgáló eszközzel ellenőrizni lehet, a *2. tervezési séma* a víztartóképesség (k_s) és a tömörödési tényező (k_{CF}) mérőszámait adja meg.

A beton összetételének a számításához szükséges algoritmusokat a *3. tervezés séma* foglalja össze. A számítás két módja lehetséges:

- vagy a cementtartalmat kell megszabni (pl. a vasbeton szerkezetekhez elő van írva a legkisebb megengedett cementtartalom [79]) és a vízadagolást, valamint az adalékanyag-tartalmat kell meghatározni,
- vagy a víz-cement tényezőt kell megszabni (pl. igen kopásálló betonra $x \leq 0,45$ [79]), és meg kell határozni a cement-, a víz-, valamint az adalékanyag-tartalmat.

A számításokhoz szükséges segédtényezők az *1.* és a *2. tervezési sémákban* találhatók.

Adalékanyag-jellemzők	***Cement-jellemzők***
Vizsgálat: *részletes szemeloszlás*	**Vizsgálat:** *S* m^2/kg *MSZ 523*

Számítás:

Finomsági modulus: $m = \dfrac{\sum a_i}{100}$

Egyenlőtlenségi együttható: $U = d_{70} / d_{10}$

$$d_{70} = 10^{y_1} \quad y_1 = \frac{\lg d_1 - \lg d_2}{a_1 - a_2}.(70 - a_2) + \lg d_2$$

$$d_{10} = 10^{y_2} \quad y_2 = \frac{\lg d_3 - \lg d_4}{a_3 - a_4}.(10 - a_4) + \lg d_1$$

Pépigény: V_{po} *liter/m*^{3}

ha $k_s \geq 40$, *akkor* $V_{po,40} =$

$$= \left(340 + 50 \lg \frac{m}{4}\right) - 38.e^{-\frac{2}{U-0,5}}.\left(m - 1,54.e^{\frac{1}{U-0,5}}\right)$$

ha $k_s < 40$, *akkor* $V_{po,s} = V_{po,40} + 45.e^{-0,.k_s}$

Vízigény $f \leq 3$ *térfogat % mellett:*

$w_a = A \,.\, e^{-B.m}$ *tömegrész*

$A = 0,3.e^{-0,22.(0,1.k_s)^{0,35}}$ $\quad B = 0,17.e^{0,13.(0,1.k_s)^{0,32}}$

Vízigény $f > 3$ *térfogat % mellett:*

$w_{af} = w_a + C \,.\, (f - 3)$ *tömegrész*

FN: C=0,001; KK: C=0,0015; K: C=0,002; F: C=0,0025

Számítás:

Vízigény: w_c *tömegrész*

$$w_c = [0,3 + 0,00028.(S - 100)]e^{-0,35.(0,1.k_s)^{0,}}$$

Adott konzisztenciájú pép cementtartalma:

$$m_{cp} = \frac{1000}{\frac{1}{3,1} + w_c} \quad \text{kg/m}^3$$

Adott konzisztenciájú pép víztartalma:

$m_{wp} = w_c \,.\, m_{cp}$ *kg/m*^{3}

Közelítés:

350-es cement: $S = 300$ *m*^{2}*/kg*

450-es cement: $S = 340$ *m*^{2}*/kg*

550-es cement: $S = 480$ *m*^{2}*/kg*

1. tervezési séma

Szabadon választott: *konzisztencia* (k_s *és* k_{CF} *mérőszámmal jellemezve)*

	AFN	FN	KK	K	F	Ő
k_s :	> 30	20-30	6-15	1-4	0,1-0,8	0
k_{CF}:	< 0,1	0,7-0,75	0,76-0,85	0,86-0,92	0,93-0,96	> 0,96

Számítás

Adalékanyag legnagyobb tömege: $m_{ao} = (1000 - V_{po,s}) \times 2,64$ *kg/m*^{3}

Alapvíztartalom: $m_{wo} = w_a \times m_{ao}$ *vagy* $w_{af} \times m_{ao}$ *kg/m*^{3}

Mértékadó cementtartalom: $m_{c2} = \dfrac{m_{wo}}{w_c}$ *kg/m*^{3}

Alap-cementtartalom: $m_{c1} = \dfrac{m_{c2}}{3}$ *kg/m*^{3}

A vízadagolás számítási állandói: $\Delta m_c = m_{cp} - m_{c1}$ *és* $\Delta m_w = m_{wp} - m_{wo}$

2. tervezési séma

<table>
<tr><td colspan="2">Szabadon választott:
m_c kg/m³ *vagy* x *víz-cement tényező*</td></tr>
<tr><td>Számítás
Szükséges vízadagolás: m'_w
$m'_c \le m_{c1}$: $m'_w = m_{wo}$
$m_{c1} < m'_c < m_{c2}$:
$$m'_w = m_{wo} + \frac{\frac{\Delta m_w}{\Delta m_c}\left(m'_c - m_{c1}\right)}{2}$$
$m'_c > m_{c2}$:
$$m'_w = m_{wo} + \frac{\frac{\Delta m_w}{\Delta m_c}\left(m'_c - m_{c1}\right) + \left(m'_c . w_c - m_{wo}\right)}{2}$$</td><td>Számítás
Szükséges cementtartalom: m'_c kg/m³
$m'_c \le m_{c1}$: $m'_c = m_{wo} / x$
$m_{c1} < m'_c < m_{c2}$:
$$m'_c = \frac{m_{wo} - \frac{\Delta m_w}{2\Delta m_c} \times m_{c1}}{x - \frac{\Delta m_w}{2\Delta m_c}}$$
$m'_c > m_{c2}$:
$$m'_c = \frac{m_{wo} - \frac{\Delta m_w}{\Delta m_c} \times m_{c1}}{2x - \left(w_c + \frac{\Delta m_w}{\Delta m_c}\right)}$$</td></tr>
<tr><td colspan="2">*továbbá mindkét esetre:*
$V'_p = \frac{m'_c}{3,1} + m'_w = V'_c + V'_w$ liter/m³ $\Delta V'_p = V'_p - V_{po}$ liter/m³ $V'_p \le V_{po}$: $m'_o = m_{ao}$ kg/m³
$V'_a = 2,64 \times m'_a$ liter/m³ $V_{ao} = 1000 - V_{po}$ liter/m³ $V'_p \ge V_{po}$: $m'_a = 2,64 \times (1000 - V'_p)$ kg/m³</td></tr>
</table>

3. tervezési séma

A várható nyomószilárdság becslésére a 4. tervezési séma ad tájékoztatást. Két módja van: közelítő számítással és vizsgálattal.

A közelítő számításra a 7.1. fejezetben megadott (107)–(112) összefüggések használhatók, amelyeket az ÉTI–ben 1978–1989 között végzett betonvizsgálataim eredményeiből határoztam meg. A (107) és (110) a nyomószilárdságok várható alsó határértékeit adják, ezért ezekkel az összefüggésekkel a becslés biztonságos, de nem feltétlenül gazdaságos. A (108) és (111)–ből a legnagyobb valószínűséggel várható átlagos nyomószilárdságok számíthatók, de egy-egy estben a számított értéknél 2-3 MPa-lal kisebb értékek is előfordulhatnak.

A becslés lényeges adata a betömörített friss beton testsűrűsége alapján számított V_l levegőtartalom, amely csak próbatestek készítésével ellenőrizhető szabatosan, a testek térfogatának szabatos meghatározásával. A közelítő számítás során a keverék várható bedolgozhatóságából kell kiindulni s általában célszerű – a biztonság érdekében – V_{lb} = 20 liter/m³ levegőtartalmat felvenni. Amennyiben $V'_p < V_{po}$, akkor természetesen $V_l = -\Delta V'_p$ további levegőtartalmat minden esetben figyelembe kell venni.

A várható nyomószilárdság vizsgálaton alapuló üzemi becslésére akkor van lehetőség, ha az üzem sorozatban készít ugyanazzal a cementfajtával kis- és nagyszilárdságú betonokat s ezek minőségének ellenőrzése elegendő adatot ad az *A* és a *B* állandók számításához. A vizsgálattal alátámasztott szilárdságbecslő függvény meghatározható olyan vállalati laboratóriumban is, ahol mód van a próbakeverésre. Ez esetben a 4. tervezési séma szerinti 1. és 2. keverékeket célszerű több alkalommal (pl. egy héten át minden nap) elkészíteni, és a képlet állandóinak a kiszámításához az átlagos nyomószilárdságot alapul venni.

A következő fejezet példát tartalmaz a betonösszetétel meghatározására.

Közelítő számítás:

A tömör beton (V_l = 0) nyomószilárdsága : $R'_o = A \times e^{-B \times \sqrt{x'}}$, ahol $x' = x \frac{v_{ao}}{V'_a}$ és $\Delta V'_p \leq 200$ *liter/m³* mellett:

	350-es cementekre			450-es cementekre		
	alsó határ	átlag	felső határ	alsó határ	átlag	felső határ
A =	*1040*	*960*	*810*	*810*	*800*	*700*
B =	*4,6*	*4,4*	*4*	*4*	*3,9*	*3,6*

Ha $V_l > 0$,akkor $R = R'_o \times e^{-0,035(0,1.V_l)^{1,3}}$ *MPa*. Ha a telítetlen beton jól van tömörítve ($V_{lb} = 0$), akkor $R_o = R'_o \times e^{-0,0035.\left[0,1\times(V_{po}-V'_{po})^{1,3}\right]}$ *MPa*

Vizsgálat:

Két betonkeveréket kell készíteni az adott adalékanyaggal és cementtel, a szükséges konzisztenciával, a nyomószilárdság 28 napos vizsgálatára. A bedolgozott beton γ_b (kg/m³) testsűrűségét szabatosan meg kell határozni.

- 1. keverék: $m'_c \sim m_{c2}$. Ha a cement:víz:adalékanyag tömegaránya *c:w:a* , akkor *n = c+w+a* (a *c:a* célszerűen *1:3* lehet), és $m_c = (\gamma_b / n).c$, $m_w = (\gamma_b / n).w$, $m_a = (\gamma_b / n).a$ *kg/m³*. A levegőtartalom: $V_l = 1000 - \{(m_c / 3,1) + m_w + (m_a / 2,64)\} = 1000 - (V_c + V_w + V_a)$, *liter /m³*. Ha a mért nyomószilárdság $V_l > 0$ mellett R_1 *MPa*, akkor a tömör ($V_l = 0$) beton R_{o1} nyomószilárdsága: $R_{o1} = R_1 \times e^{0,035.(0,1.V_l)^{1,3}}$ *MPa*. A víz-cement tényező: $x_1 = m_w / m_c$, a módosított víz-cement tényező: $x' = x \,.\, (V_{ao} / V'_a)$. Megjegyzendő, hogy a cementtartalom a 2. tervezési séma, a szükséges vízadagolás és adalékanyag tartalom a 3. tervezési séma szerint is számítható.
- 2.keverék: célszerűen $V'_p = V_{po}$. Az adalékanyag adott konzisztenciához tartozó $V_{po,\,ks}$ pépigényét az 1. tervezési séma szerint kell kiszámítani. A beton cementtartalma (m_{co} *kg/m³*):

  ha $m_{co} \leq m_{v1}$, akkor $m_{co} = (V_{po} - m_{wo}) \times 3,1$ *kg/m³*

  ha $m_{co} > m_{c1}$, akkor $m_{co} = \dfrac{V_{po} + m_{c1}\dfrac{\Delta m_w}{2\Delta m_c} - m_{wo}}{\dfrac{1}{3,1} + \dfrac{\Delta m_w}{2\Delta m_c}}$ *kg/m³*

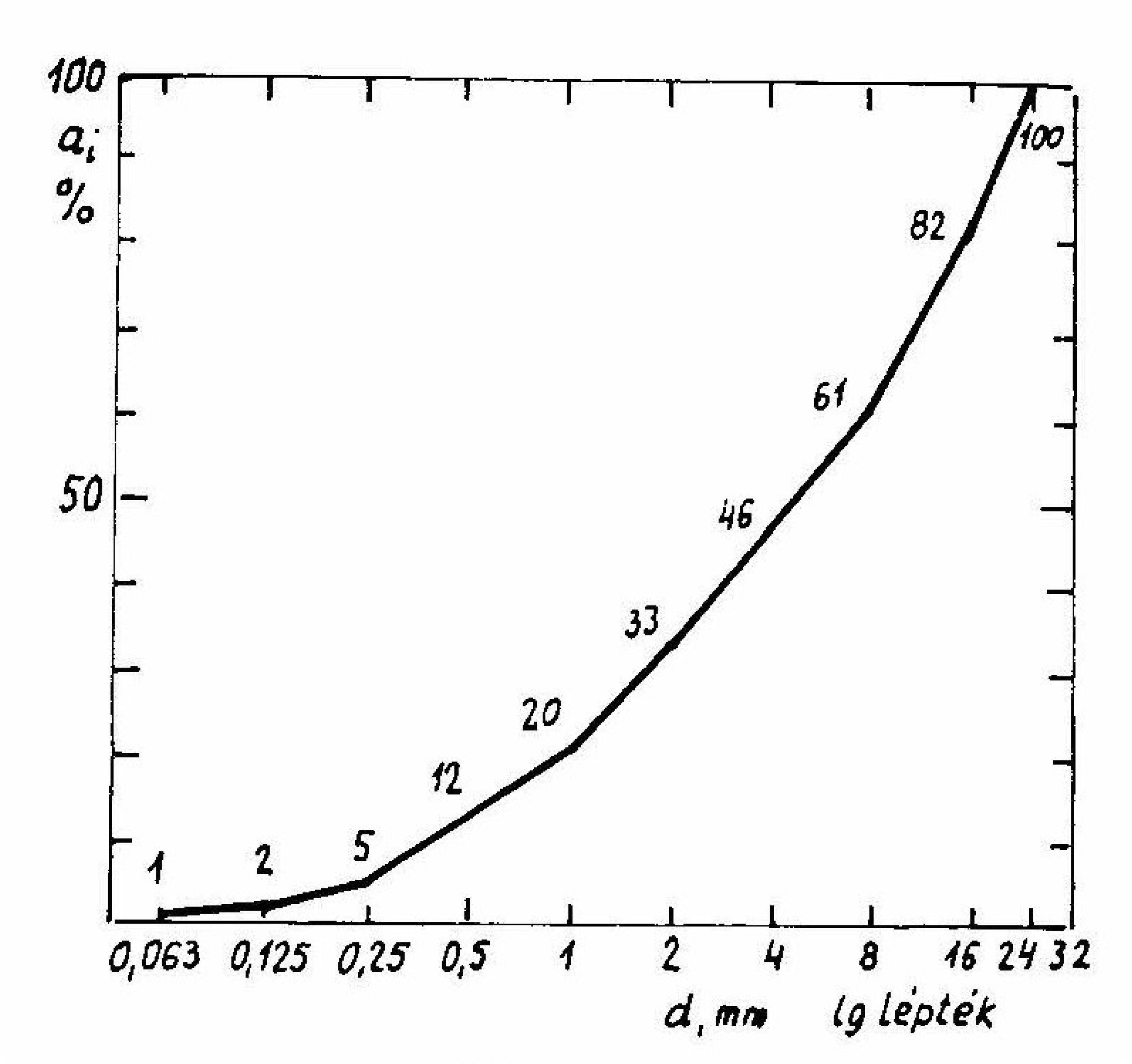
  Vizsgálandó: V_l (mint az első keverék esetében), továbbá R_2 nyomószilárdság. Ha $V_l > 0$, akkor ki kell számítani a tömör beton $R_{02} = R'_{02} = R_2 \times e^{0,035.(0,1.V_l)^{1,3}}$ *MPa* nyomószilárdságát. Mivel $V'_p = V_{po}$, ezért $x' = x$. Az $R'_o = A \times e^{-B.\sqrt{x'}}$ függvény állandói:

$$A = \frac{\sqrt{x'_2} \times \ln R'_{01} - \sqrt{x'_1} \times \ln R'_{02}}{\sqrt{x'_2} - \sqrt{x'_1}} \quad \text{és} \quad B = \frac{\ln \frac{R'_{01}}{A}}{\sqrt{x'_1}} = \frac{\ln \frac{R'_{02}}{A}}{\sqrt{x'_2}}$$

4. tervezési séma

7.3. Példa a beton összetételének tervezésére

Az alábbikban bemutatom a 63. ábra szerinti szemeloszlású homokos kaviccsal és 350 kspc 20 cementtel készített, képlékeny konzisztenciájú (k_s = *1,5*) betonok összetételének és nyomószilárdságának tervezését az *1.–4. tervezési sémák* segítségével.



63. ábra

Az 1. tervezési sémának megfelelően az adalékanyag jellemzői: $m = 6{,}38$ és $U = 26{,}3$, továbbá $V_{po,40} = 350{,}1 - 35{,}17 \times 4{,}78 = 182{,}1$ *liter/m*^{3}, valamint $V_{po,1,5} = 182{,}1 + 45 \times \exp -0{,}15 = 220{,}8$ *liter/m*^{3}. Az adalékanyag vízigénye az 1. tervezési séma szerint:

$$w_a = 0{,}268 \times \exp(-\,0{,}182 \times 6{,}38) = 0{,}0836 \text{ tömegrész}$$

A cement jellemzői az 1. tervezési séma szerint $S = 300$ *m*^{2}*/kg* és vízigénye:

$$w_c = (0{,}3 + 0{,}00028 \times 200) \times \exp(-0{,}35 \times 0{,}15^{0,25}) \text{ tömegrész}$$

Az adott konzisztenciájú pép cement- és víztartalma: $m_{cp} = 1642$ *kg/m*^{3} és $m_{wp} = 470$ *kg/m*^{3}.

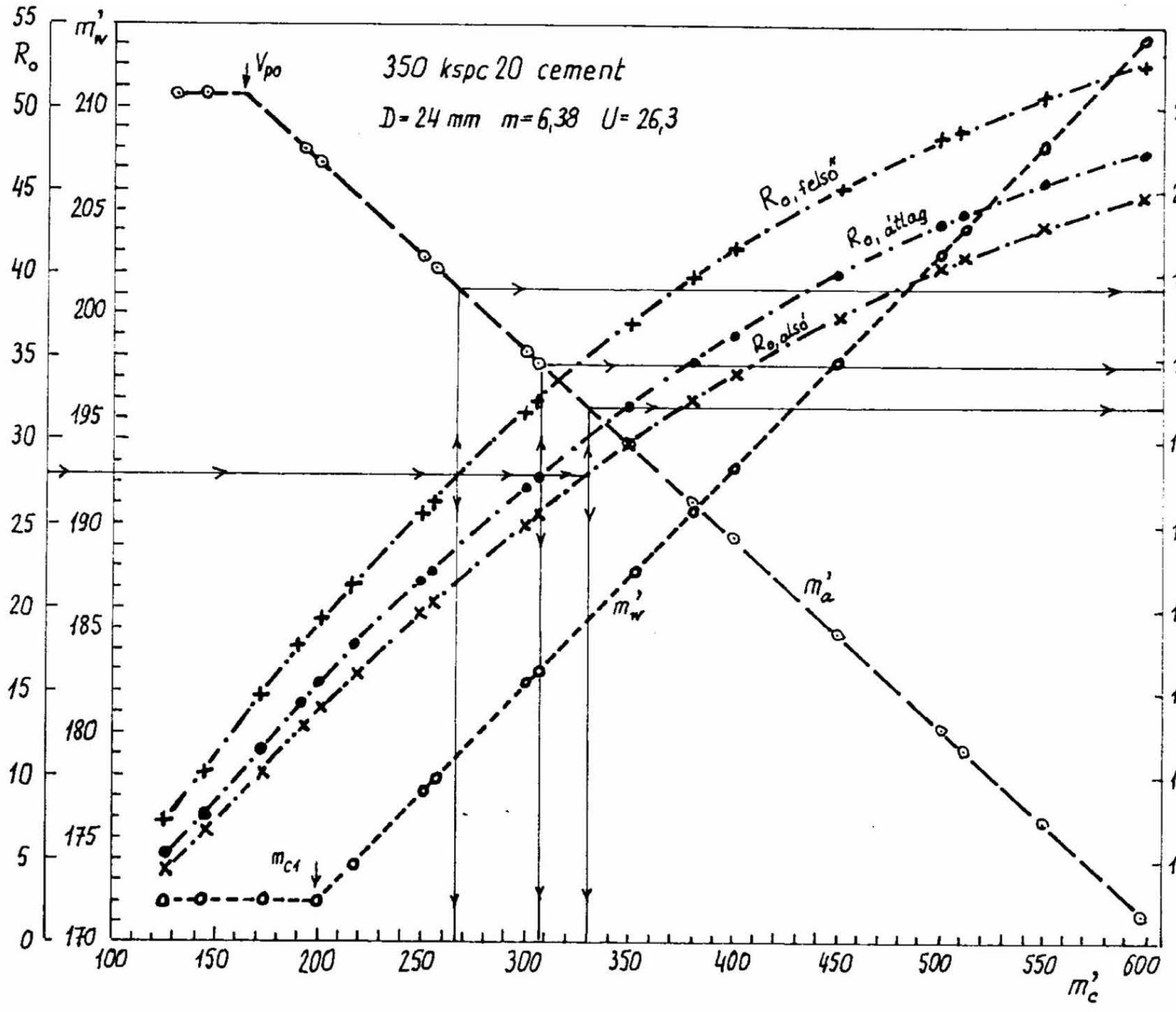
A képlékeny konzisztenciájú keverék alapjellemzői a 2. tervezési sémának megfelelően:

$$m_{ao} = (1000\text{-}221) \times 2{,}64 = 2057 \text{ kg/m}^3$$

$$m_{wo} = 2057 \times 0{,}0836 = 172 \text{ kg/m}^3 \qquad m_{c2} = 172 / 0{,}286 = 601 \text{ kg/m}^3 \qquad m_{c1} = 601/3 = 200 \text{ kg/m}^3$$

A cementtartalomból vagy a víz-cement tényezőből kiinduló számításhoz szükséges állandók: $\Delta m_c = 1642 - 200 = 1442$ *kg/m*^{3} és $\Delta m_w = 470 - 172 = 298$ *kg/m*^{3}.

A betonösszetételeket a 3. tervezési séma szerint lehet megállapítani. Az adatokat a 9. táblázat tartalmazza: első részben a cementtartalom, második részben a víz-cement tényező felvételével számított értékeket csoportosítottam. A nyomószilárdságokat a (107)–(109) összefüggésekből határoztam meg. Ha $\Delta V'_p < 0$, akkor $R_o = R'_o$ (nincs péphiány), ha viszont $V'_p < 0$, akkor a péphiány miatt $R_o < R'_o$. A 9. táblázatban $m_c = 125$ *kg/m*^{3} mellett a péphiány $8{,}5$ *liter/m*^{3}, ezért a jól tömörített betonok R_o nyomószilárdságának alsó, átlag és felső értéke rendre: *4,4; 5,3* és *7,2 MPa.*



64. ábra

A számítási eredményekből célszerű a 64. ábra szerinti nomogramot szerkeszteni, melyről bármilyen átlagos nyomószilárdsághoz tartozó betonösszetétel leolvasható. Ha például R_o = *28 MPa* átlagos nyomószilárdságú betont kell készíteni a 64. ábra szerinti alapanyagokból, akkor a betonösszetételek a következők:

alsó határértékre:	$m_c = 330\ kg/m^3$	$V_p = 292\ liter/m^3$	$x = 0{,}362$
	$m_w = 185\ kg/m^3$	$V_a = 708\ liter/m^3$	$x' = 0{,}618$
	$m_a = 1870\ kg/m^3$	R_o [a (107)-ből] = 28 MPa	
átlagos értékre:	$m_c = 307\ kg/m^3$	$V_p = 282\ liter/m^3$	$x = 0{,}596$
	$m_w = 183\ kg/m^3$	$V_a = 718\ liter/m^3$	$x' = 0{,}647$
	$m_a = 1896\ kg/m^3$	R_o [a (108)-ból] = 28 MPa	
felső határértékre:	$m_c = 266\ kg/m^3$	$V_p = 265\ liter/m^3$	$x = 0{,}672$
	$m_w = 179\ kg/m^3$	$V_a = 735\ liter/m^3$	$x' = 0{,}712$
	$m_a = 1941\ kg/m^3$	R_o [a (109)-ből] = 28 MPa	

A beton összetételének a tervezésekor a biztonság érdekében célszerű $V_{lb} = 20\ liter/m^3$ (2 térfogat%) levegőtartalmat számításba venni, következésképpen a 9. táblázat szilárdságait rendre meg kell szorozni $exp(-\ 0{,}035 \times 2^{1,3}) = 0{,}917$ értékkel, és a 64. ábra szerinti nomogramot ezekre a szilárdságokra kell megszerkeszteni. A módosított ábráról adott átlagos nyomószilárdsághoz nagyobb cement- és víztartalom, kisebb adalékanyag-tartalom olvasható le, mint a $V_{lb} = 0$ felvételével szerkesztett ábráról.

7.4. A betonösszetétel meghatározása adott szilárdsági jelre

A 7.3. fejezetben adott átlagos nyomószilárdságú beton összetételének tervezését mutattam be. Ismeretes, hogy a vasbeton szerkezetek méretezésének új MSZ 15022 szabványa részben valószínűségi elveken alapul s ehhez kapcsolódik a minősítés új MSZ 4720 szabványa, amely a beton küszöbszilárdságát írja elő. Az MSZ 4720 készítésekor – szakirodalmi adatok alapján, pl. [81]–[83] – két alapvető feltételezést fogadtak el:

- ✓ a beton nyomószilárdságának variációs tényezője általában *v = 15 %*, és
- ✓ a nyomószilárdság valószínűségi eloszlása megfelel a Gauss-féle normális eloszlásnak.

Ha az $R_{k,nom}$ minősítési szilárdságot az 5 % alulmaradási valószínűséghez rendeljük, akkor a normális eloszlás feltételezésével:

$$R_{k,nom} = \bar{R} - 1{,}645 \times s \qquad (118)$$

ahol s = a nyomószilárdság négyzetes szórása, MPa. Minthogy a szakirodalom alapján feltételezhető volt, hogy $v = 15\ \%$, ezért $s = 0{,}15 \times \bar{R}$, következésképpen

$$R_{k,nom} = \bar{R} - 1{,}645 \times 0{,}15 \times \bar{R} = 0{,}75325 \times \bar{R} \quad MPa \qquad (119)$$

illetve

$$\bar{R} = 1{,}32758 \times R_{k,nom} \quad MPa \qquad (120)$$

A korábbi MSZ 4720 azt követelte meg, hogy az egy keverésből vett 3 db 20 cm-es próbakocka átlagos nyomószilárdsága kp/cm^2-ben kifejezve legyen egyenlő vagy nagyobb a beton szilárdsági jelénél. Ezért pl. B 200 betonra $\bar{R} \geq 200\ kp/cm^2$ (20 MPa). Az új MSZ 4720 – az ismertetett feltételezések alapján – ennek a betonnak a minősítési szilárdságát $R_{k,20,nom} = 0{,}75325 \times 20 = 15\ MPa$-ban szabta meg, ill. ∅15×30 cm-es hengeren vizsgálva: $R_{k,\varnothing,\ nom} = 13\ MPa$. Következésképpen a régi B 200 jelű beton az új szabvány szerint C 13 jelűnek felelne meg. Megjegyzendő azonban, hogy az új szabvány nem a régi B 50 .... B 560 jelűekre pontosan illeszkedő betonosztályokat, hanem a nemzetközi gyakorlatban alkalmazott C 4 .... C 55 betonosztályokat írt elő. Függetlenül azonban a betonosztályok változásaitól, az új betonosztályokhoz tartozó átlagos nyomószilárdság akkor felel meg a régi szabvány szerinti minőségnek, ha fennáll a (120) szerinti egyenlőség.

Elvileg lehetséges tehát, hogy a beton összetételét az $R_{k,nom}$-ból a (120) szerint kiszámított átlagos nyomószilárdsághoz rendeljük, de figyelembe kell venni, hogy a *C* jel az ∅15×30 cm-es hengeren mért nyomószilárdságra vonatkozik, a beton minőségének az ellenőrzésére azonban 15 cm vagy 20 cm élhosszúságú kockákat használunk. Az eltérő méretű és alakú próbatestekhez tartozó minősítési szilárdságokat az MSZ 4720 foglalja össze. Például a *C 12* jelű beton 15 cm élhosszúságú

kockával ellenőrzött minősítési szilárdsága: $R_{k,15,nom}$ = *15 MPa*, ezért az ugyanerre a kockára vonatkoztatott átlagos nyomószilárdság a (120) szerint: *1,32758×15 ~ 1,33×15 = 20 MPa*. Ha ezt a *C 12* jelű betont a 63. ábra szerinti adalékanyaggal és 350-es cementtel készítik, akkor összetétele a 64. ábráról olvasható le a 7.3. fejezetben ismertetett módon.

A betonösszetétel meghatározásának ez a módszere azonban nem ad mindig megfelelő eredményt, mert a példa szerinti esetben felvett 20 MPa átlagos nyomószilárdság csak *v = 15 %*-ra, azaz *s = 3 MPa* szórásra illeszkedik. Ha a tényleges szórás ennél nagyobb, akkor nagyobb átlagos nyomószilárdságra van szükség, ha pedig kisebb, akkor a 20 MPa-ra meghatározott betonösszetétel nem gazdaságos.

A tényleges szilárdsági szórást általában nem ismerik és csak ritkán van arra lehetőség, hogy az MSZ 4720 szerint megvizsgálják. Ezen túlmenően a Gauss-féle normális eloszlás sem bizonyult általánosan elfogadhatónak [84], hanem a beton nyomószilárdságától és a munkahelyi adottságoktól függő ferdeségű lehet. Ezt az MSZ 4720 a „*k*” ferdeségi együtthatóval kísérelte meg figyelembe venni a [84] alapján, de a sűrűségfüggvény a szabványban feltételezettektől eltérően is alakulhat, ezért a „*k*” együttható alkalmazása sem ad teljesen megnyugtató eredményt.

A beton nyomószilárdságának ingadozása, szórása nem véletlenszerű, hanem meghatározott tényezőktől függ. Ha tehát a szórást befolyásoló tényezők közül kiválasztjuk a legfontosabbakat s e tényezők gyakorlatilag várható legkedvezőtlenebb értékeire állapítjuk meg a betonösszetételeket, akkor az ezekkel az összetételekkel elérhető nyomószilárdságok a várható minimális nyomószilárdságok lesznek. Ebből viszont az következik, hogy ezzel a módszerrel minősítési szilárdságot megbízhatóan kielégítő betonösszetételt lehet meghatározni.

A nyomószilárdság ingadozását a dolgozatomban ismertetett számítási módszerekkel meg lehet határozni. Példaképpen a következő előírt összetételű beton nyomószilárdságának várható ingadozását ellenőriztem különböző, a szilárdságot befolyásoló tényezők változásának a hatására (lásd 9. táblázat és 64. ábra):

> *D = 24 mm> m = 6,38; U = 26,3; 350-es cement; képlékeny konzisztencia* (k_s = *1,5*); $V_{po,\,1,5}$ *=220,8 liter/m*^{3}*;* m_c *= 310 kg/m*^{3}*;* m_a *= 1893 kg/m*^{3}*;* V_p *= 283 liter/m*^{3}*; x = 0,59; x' = 0,641;* a (108)-ból számított, átlagos szilárdságú cement alkalmazásakor elérhető nyomószilárdság: R_o *= 28,3 MPa.*

A nyomószilárdság várható szélső értékeinek számításakor csak egy-egy tényező elkülönített változását vettem figyelembe, minden más tényező változatlan maradt. Számításaim eredményei a következők:

a) A cementtartalom változása:

m_c	305 – 315	300 – 320	295 – 325	290 – 330
x	0,6 – 0,581	0,61 – 0,572	0,62 – 0,563	0,631 – 0,554
V_{po}	281,4 – 284,6	279,8 – 286,2	278,2 – 287,8	276,5 – 289,3
x'	0,651 – 0,633	0,66 – 0,624	0,669 – 0,616	0,68 – 0,608
R_o	27,5 –29	26,9 – 29,7	26,3 – 30,4	25,5 – 31,1

Megjegyzés: a vízadagolás változatlansága miatt a konzisztencia kismértékben változik.

b) A cement kötőerejének a változása:

	alsó határ (107)	átlag (108)	felső határ (109)
R_o	*26,2*	28,3	32,9

c) Az adalékanyag finomsági modulusának a változása:

m	*6,28 – 6,48*	*6,08 – 6,68*	*5,78 – 6,98*	*5,38 – 7,38*	*4,88 – 7,88*
V_{po}	223,9 – 217,6	230,3 – 211,3	235,6 – 201,7	252,2 – 184,6	267,7 – 172,6
m_w	185,4 – 181,3	189,7 – 176,9	197,3 – 171,5	205,8 – 164,8	213,8 – 155,5
V'_p	285,4 – 281,3	289,7 – 276,9	297,3 – 271,5	305,8 – 264,8	313,8 – 255,5
x'	*0,649 – 0,637*	*0,663 – 0,623*	*0,692 – 0,606*	*0,715 – 0,590*	*0,719 – 0,558*
R_o	27,7 – 28,7	26,7 – 29,8	24,7 – 31,2	23,2 – 32,7	22,0 – 35,9

d) Az adalékanyag agyag-iszap tartalmának a változása:

f	3	4	5	6	7	8	9	10
m_w	183,0	186,8	190,3	193,8	197,5	201,1	204,5	208,,1
V'_p	283	286,8	290,3	293,9	297,5	301,1	304,5	308,1
x	0,59	0,603	0,614	0,626	0,637	0,649	0,66	0,671
x'	0,641	0,659	0,674	0,691	0,707	0,724	0,739	0,756
R_o	28,3	27	25,9	24,8	23,8	22,7	21,8	20,9

e) A konzisztencia – vízadagolás – változása

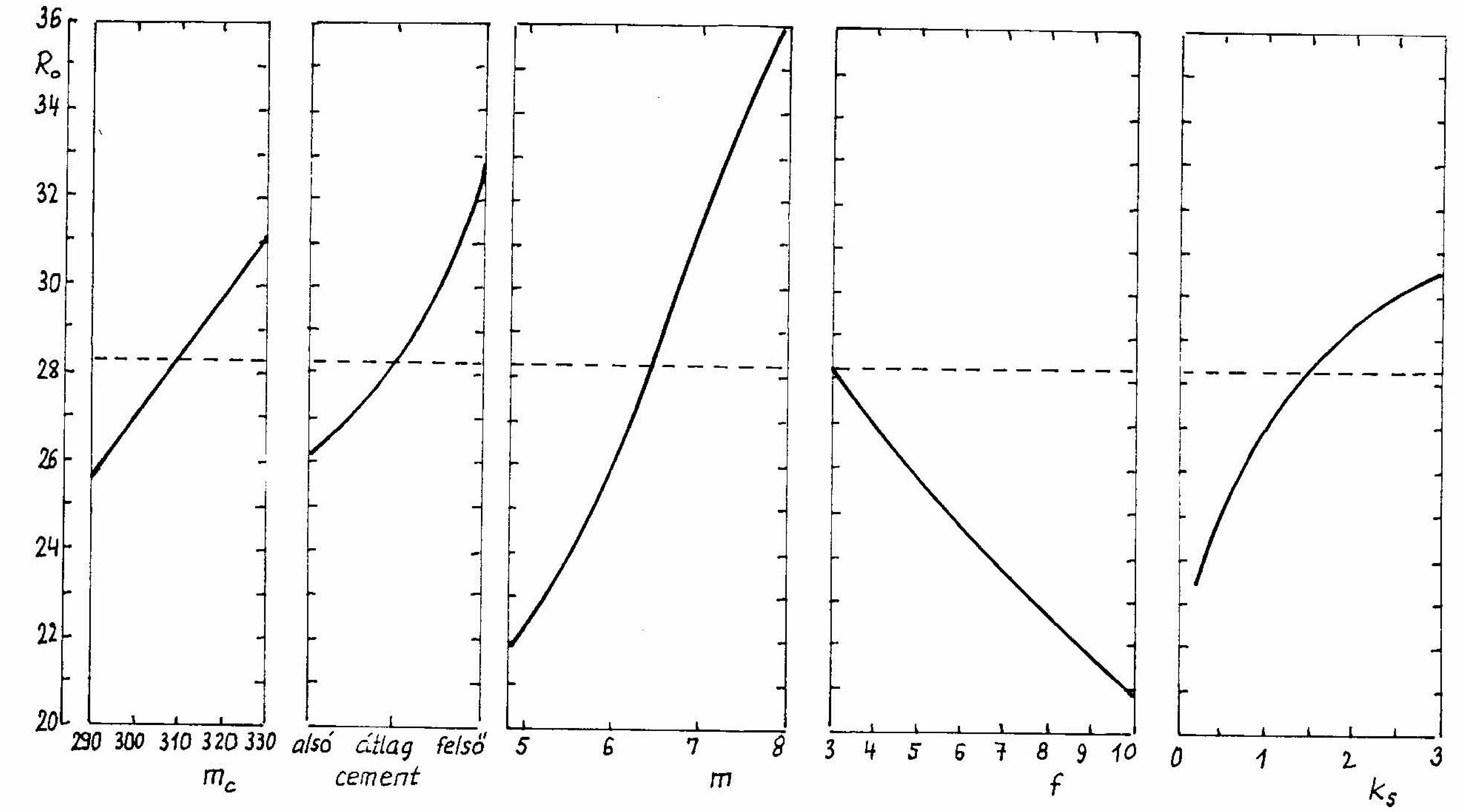
k_s	0,2	0,5	1	1,5	2	3
V_{po}	226,2	224,9	222,8	220,8	218,9	215,4
m_w	200,1	192,8	186,7	183	180,8	175,6
V'_p	300,1	292,8	286,7	283	280,8	275,6
x	0,645	0,622	0,602	0,59	0,583	0,566
x'	0,713	0,682	0,656	0,641	0,633	0,613
R_o	23,4	25,4	27,2	28,3	29	30,6

f) A betömörített friss beton tömörségének a változása:

V_l	10	20	30	40	50	60
R	27,3	26	24,5	22,9	21,3	19,8

A fenti számítások eredményeit a 65. és a 66. ábrákon mutatom be, amelyekről leolvasható, hogy a nyomószilárdság akkor ingadozik ± 2 MPa értékkel, ha

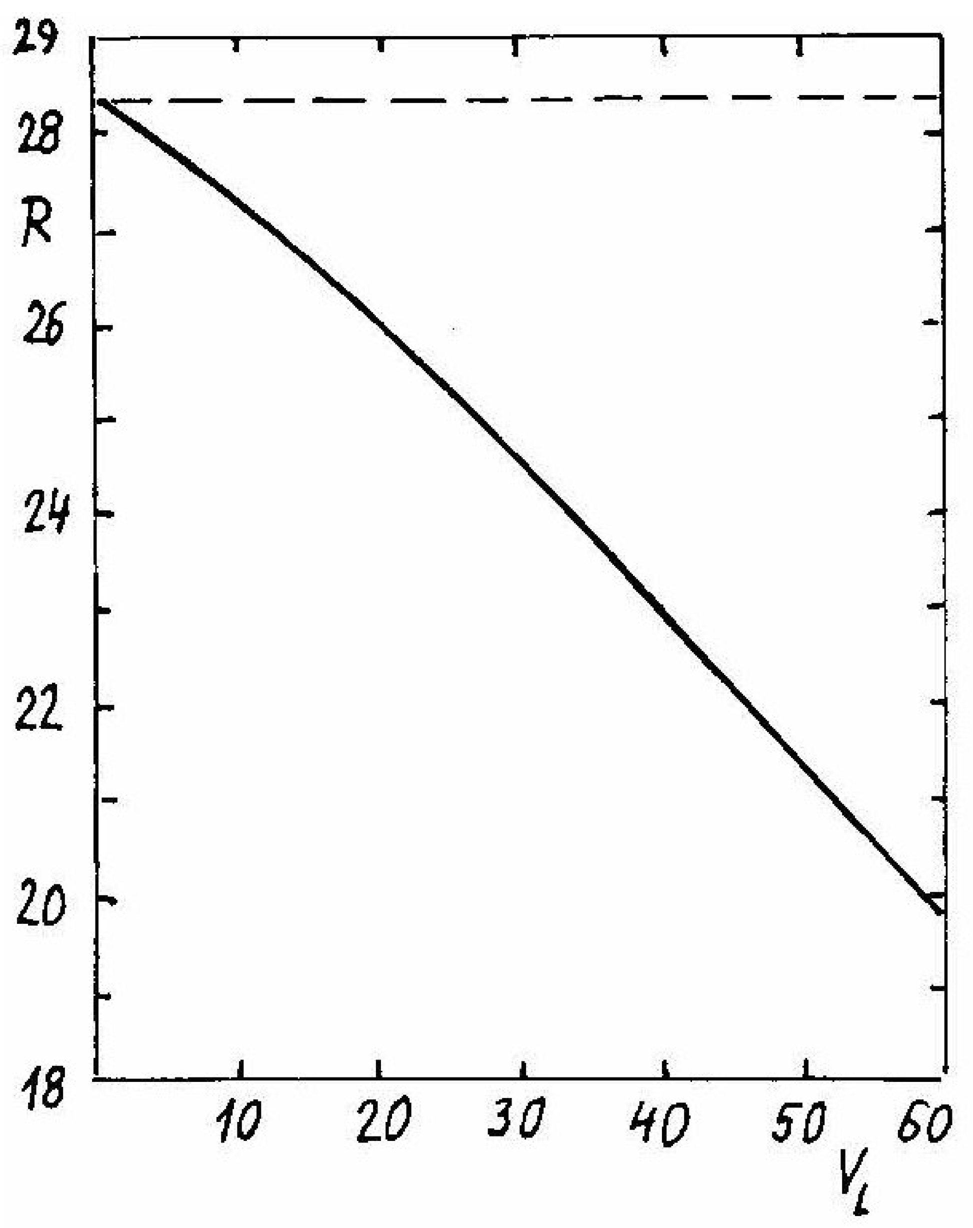
- a cementtartalom eltérése ± 15 kg/m^3;
- a felhasznált, adott szilárdsági jelű cement tényleges kötőereje szinte a teljes tartományt lefedi;
- az adalékanyag finomsági modulusának eltérése ± 0,35;
- az adalékanyag agyag-iszap tartalmának eltérése ± 2 térfogat %;
- a betonkeverék konzisztenciája az előírt képlékeny tartományon belül marad;
- a friss bedolgozott beton levegőtartalmának eltérése ± 15 liter/m^3.



65. ábra

A betonkészítés technológiájából következik, hogy a cementtartalom ingadozása csekély, mert a mérlegek ± 2 % pontossággal adagolnak (m_c = 310 kg/m^3 mellet tehát ± 6 kg/m^3 lehet az eltérés) s csak akkor lesz a cementtartalom ingadozása ennél nagyobb, ha az adalékanyag ned-

vességtartalmát nem veszik figyelembe (ez cementadagolás-többletet okoz). Ezért a cementtartalom, vagy a cement-kötőerő változása nem járhat jelentős szilárdság-változással.



66. ábra

Az adalékanyag finomsági modulusának ± 0,35-nél nem nagyobb változása csak akkor várható, ha az adalékanyag-keveréket élesen osztályozott, legalább három frakcióból állítják össze. Osztályozatlan adalékanyag használatakor az *m* ± 1,5 értékkel is ingadozhat. Az agyag-iszap tartalom változása a lelőhelyeken ± 5 térfogat %-ot is elérhet, ezért mosatlan adalékanyagban az agyagszennyeződés eltérése ± 2 térfogat %-nál nagyobb.

A betonkeverék konzisztenciája általában az előírt tartományon belül marad (bár kétségkívül a lágyabb határ közelében) és a bedolgozott friss beton levegőtartalmának eltérése – szokványos bedolgozási körülmények között – nem lépi túl a ± 15 liter/m^3-t.

A fentiekből következik, hogy ha egy adott szilárdsági jelű beton összetételét az adalékanyag várható legkedvezőtlenebb szélső értékéből, valamint az előírt konzisztencia-tartomány lágyabb határértékéből kiindulva, V_l = *20 liter/^{3}* felvételével illesztjük a minősítő szilárdsághoz, akkor – a durva hibáktól eltekintve – a keverékekből készített beton legkisebb szilárdsága a minősítő szilárdsággal lesz egyenlő.

A csak költséges vizsgálatokkal ellenőrizhető szórás helyett tehát az adalékanyag-tulajdonságok várható alsó határértékeit kell megállapítani (ez egyszerű módon vizsgálható, vagy nagy biztonsággal becsülhető), valamint fel kell mérni a készítési technológia kedvezőtlen hatásait (adagolási pontatlanság, az adalékanyag nedvességtartalom és a konzisztencia változásai, a tömörítési hiány miatti levegőtartalom), amelyekre már elegendő gyakorlati tapasztalatok vannak. Az alsó határértékeken alapuló módszer már csak azért is szabatosabb a szóráson alapulónál, mert a szilárdságot meghatározó cement tulajdonságait kizárólag az alsó határértékekkel (kötőerő, őrlésfinomság) lehet szabályozni, ezért a betonösszetétel tervezése, ill. a minősítés ellentmondásai feloldhatók. Az ellentmondás elsősorban abból ered, hogy a teherbírás ellenőrzésekor a szükségesnél nagyobb szilárdságok ugyanolyan kedvezőtlenül – sokszor kedvezőtlenebbül – hatnak a szórásra, mint a szükségesnél kisebb szilárdságok.

A következő fejezet a betonösszetételnek a minősítési szilárdsághoz való illesztését mutatja be.

7.3. Példa a beton összetételének a minősítő szilárdsághoz való illesztésére

A 7.3. fejezetben bemutatott példában az adalékanyag jellemzői: *D = 24 mm; m = 6,38* és *U = 26,3.* A betonkeverék konzisztenciája képlékeny *(k_s = 1,5)*, a cement 350 kspc 20 jelű. Ha az adalékanyagot két frakcióból (dunai homokból és dunai kavicsból) állítják elő, akkor a finomsági modulus alsó határértéke *m ~ 5,7*-re tehető, az *U* valószínűleg csökken, de kedvezőtlenebb, ha változatlan marad (ekkor ugyanis kisebb a pépigény, és így nagyobb a ΔV_p), az agyag-iszap tartalom kedvezőtlen esetben *f = 6 térfogat %*, a képlékeny konzisztencia leglágyabb határértéke $k_s \sim 1$. A szilárdságot a cement alsó határértékéhez tartozó (107) függvényből lehet kiszámítani, V_{lb} = *20 liter/m^3* feltételezésével.

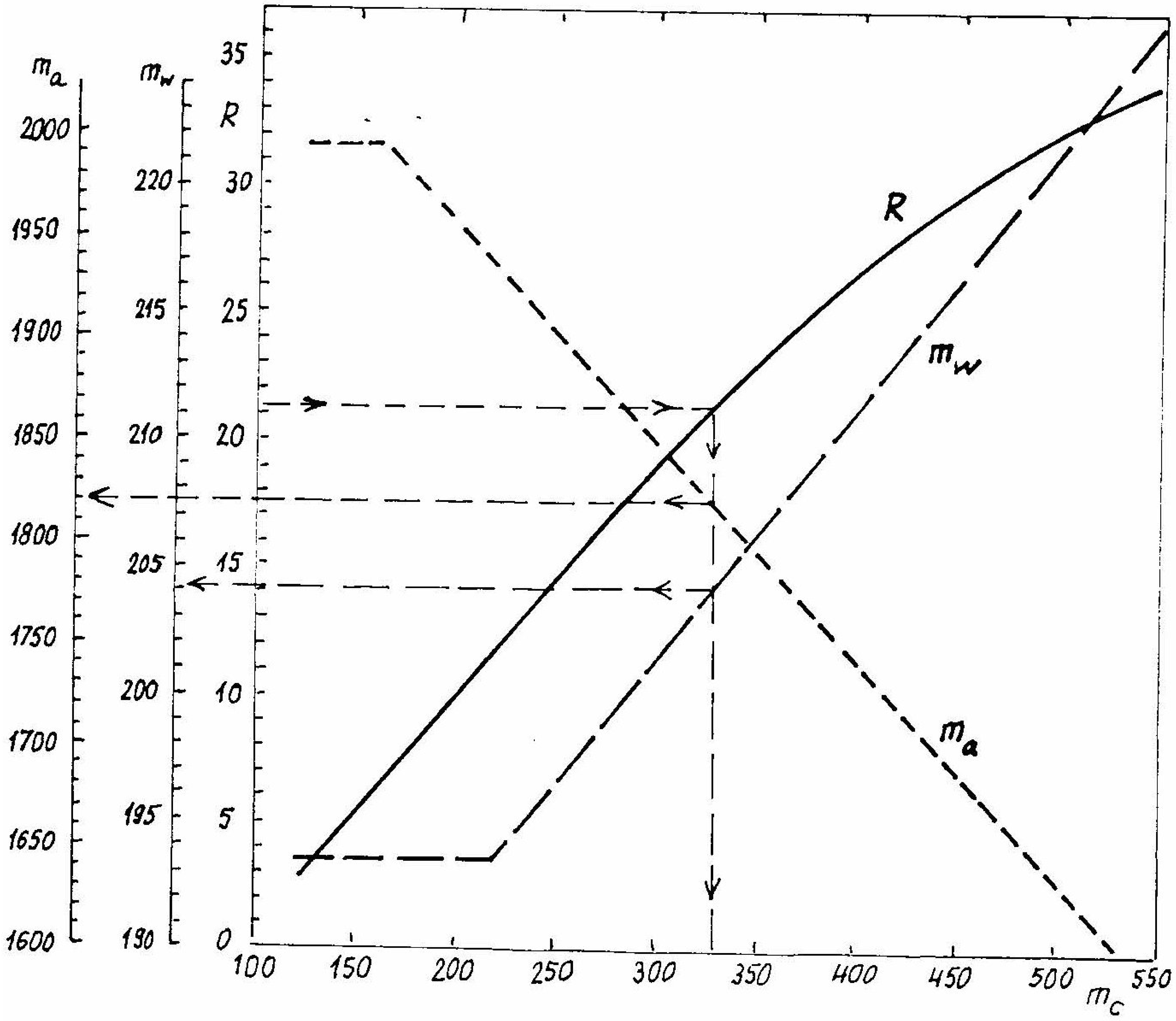
Ezekhez a kiinduló adatokhoz a 10. táblázatban összefoglalt betonösszetételek tartoznak, amelyeknek a 64. ábra szerinti faldolgozása a 67. ábrán látható.

A 7.3. fejezetben kidolgozott 64. ábrán $\bar{R}$ = *28* MPa átlagos nyomószilárdságú beton összetételének a leolvasását mutattam be. A (119)-ből számítva ennek minősítési szilárdsága $R_{k,nom}$ = *21,1 MPa*. A 67. ábrán a 21,1 MPa nyomószilárdsághoz tartozó betonösszetétel meghatározását vékony szaggatott vonallal jelöltem, az eredmények:

m_c = *327 kg/m^3;* m_w = *204 kg/m^3;* m_a = *1820 kg/m^3;* x = *0,625;* V'_p = *310 liter/m^3;* $V_{po,1}$ =*244 liter/m^3; x' = 0,685;* R_o == *23 MPa* és V_l = 20 liter/m^3 mellett: *R = 21 MPa.*

Ez a betonösszetétel összevethető a 7.3.fejezetben a cementszilárdság alsó határértékével számított adatokkal: a cementtartalom gyakorlatilag ugyanannyi, a 67. ábráról kb. 20 kg/m^3-rel nagyobb víztartalom és emiatt kb. 20 liter/m^3-rel, azaz kb. 50 kg/m^3-rel kevesebb adalékanyag-tartalom olvasható le. Ez tehát azt jelenti, hogy a példa szerinti feltételek mellett mindkét tervezési eljárással

(összetétel tervezése átlagos nyomószilárdságra, ill. minősítési szilárdságra) gyakorlatilag ugyanazt a cementtartalmat lehet meghatározni.



67. ábra

Ha az adalékanyagot kettőnél több frakcióból (pl. 0-1, 1-4 és 4-24 mm) állítanánk össze, akkor *m* alsó határa kevésbé térne el az átlagtól, mint két frakció mellett, és ez esetben a minősítési szilárdságra számított cementtartalom valamivel elmaradna az átlagos nyomószilárdságra számított értéktől a szilárdsági szórás csökkenése miatt.

7.6. Az értekezés szilárdságbecslő eljárásának összevetése egyéb hazai vizsgálatok eredményeivel

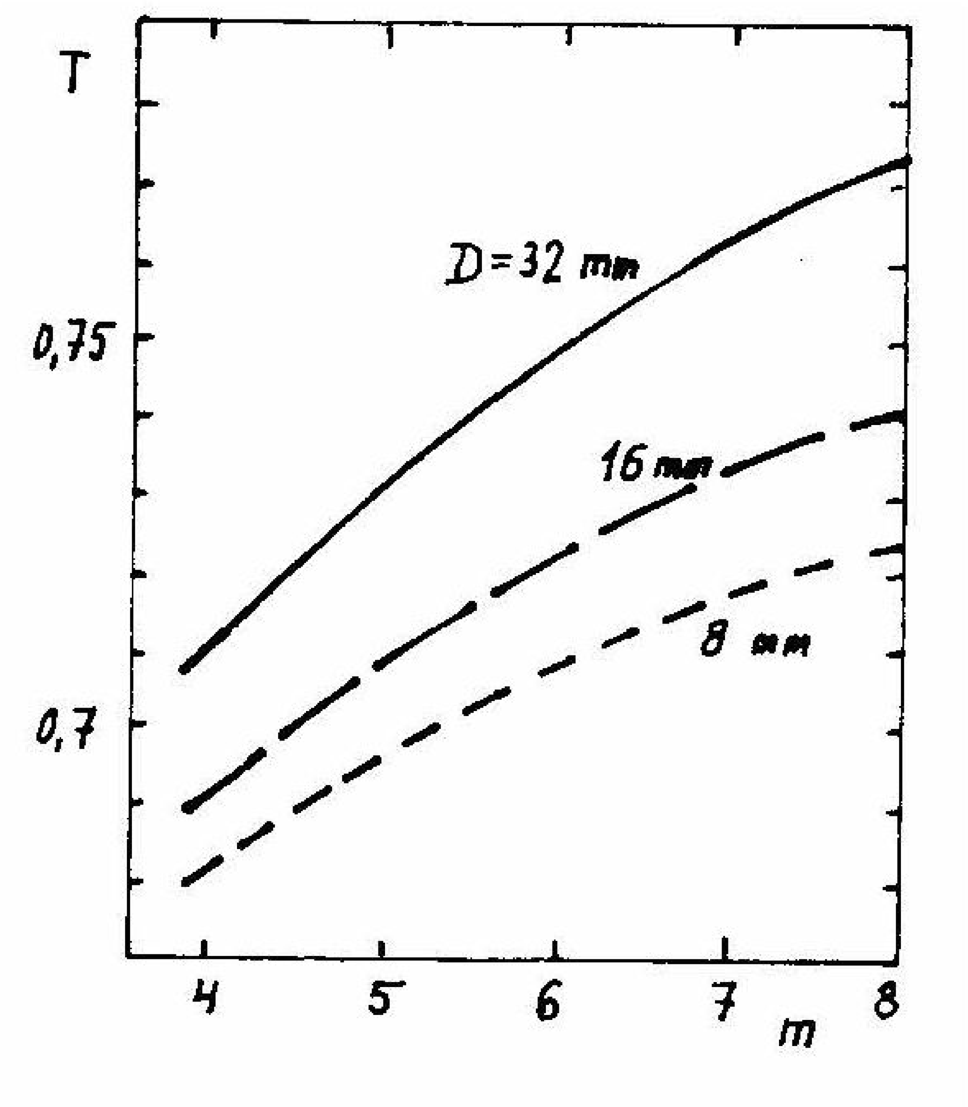
A beton nyomószilárdságát meghatározó egyik lényeges paraméter az adalékanyag pépigényének és a beton péptartalmának a viszonya, azaz a beton telítettsége. Ennek hatását az elmúlt évtizedben a BME Építőanyagok tanszékén PALOTÁS, BALÁZS, THANH és ZSIGOVICS több alkalommal vizsgálták, eredményeik az értekezésemben közöltekkel többnyire azonos tendenciákat mutattak ki, de a péptelítettség hatásának a megítélésében eltérő következtetéseket is megengedtek. A következőkben az ellentmondásokat kísérelem meg feloldani.

A pépigénnyel bizonyos mértékig arányos az adalékanyag halmazának a hézagtérfogata (V_H *liter/m*^{3}), amelynek számítására PALOTÁS korábban [86] – vizsgálatai alapján – az alábbi kifejezést javasolta:

$$V_H = 370 - (92 + 2,5 \times D) \times lg\,(m - 1,1) \quad liter/m^3 \qquad (121)$$

A fenti képletből számított hézagtérfogatok alapján meghatározott tömörség *m* és *D* függvényében a 68. ábrán látható. Megjegyzem, hogy ez az összefüggés csak azonos graduáltságú szemcsés halmazokra lehet érvényes. PALOTÁS (121) képletének az a felismerése lényeges, hogy a maximális hézagtérfogat egyszemcsés adalékanyaggal érhető el (ezt fejezi ki a képlet 370 liter/m^3 állandója) s ha nem egyszemcsés, akkor a hézagtérfogat csökken.

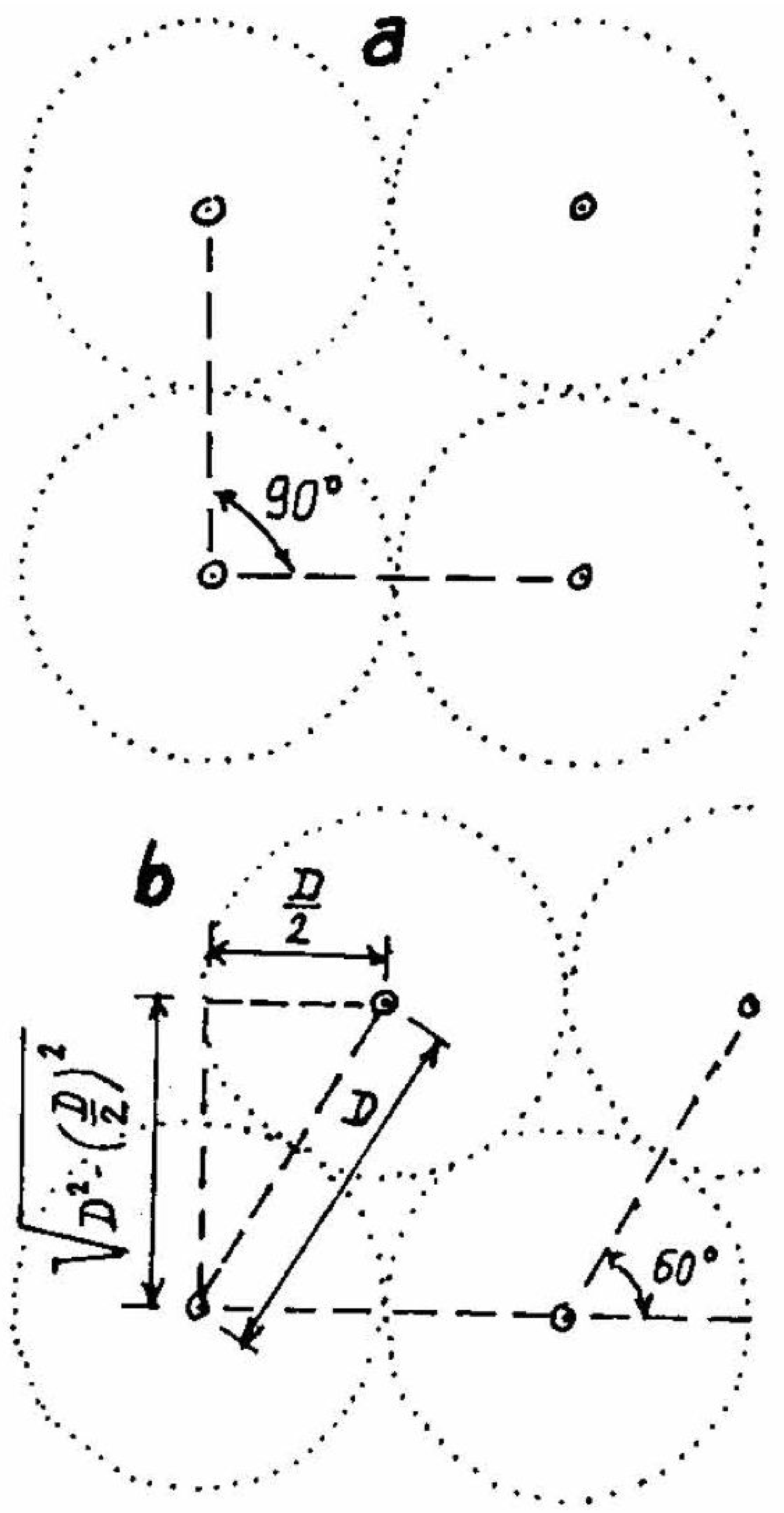
Az azonos gömbökből álló halmaz hézagtérfogata számítható {lásd 4.1.fejezet [54] – [56], ill. (51}. A gömbök leglazább elhelyezkedésekor (69/a ábra, α = 90°) és az (51)-ből V_H = *476,4 liter/m³*, míg a legtömörebb elhelyezkedéskor (69/b ábra, α = 60°) V_H = *301,9 liter/m³*, függetlenül a legnagyobb szemnagyságtól.



68. ábra

SLICHTER-től függetlenül – egyszerű geometriai megközelítéssel – magam is azonos eredményhez jutottam. Felvéve 1000×1000×1000 mm³ = 1 m³ térfogatú kockát, ebbe a 69/a ábrának megfelelő illeszkedés mellett (α = 90°) pl. D = 10 mm átmérőjű gömbökből n = 100×100×100 = 10^6 db. szemcse helyezhető el. Egy szemcse térfogata *V = 523,6 mm³*, az *n* = 10^6 db. szemcséé tehát *0,5236 m³*, ezért a hézagtérfogat V_H = *476,4 liter/m³.* A 69/b ábrának megfelelő elrendezésben *D = 10 mm* mellett a szemcsék száma – minthogy két irányban *n = 100 db.* szemcse helyezhető el – *n* = $100 / \{D^2 - (D/2)^2\}^{0,5}$ = *115,47 db* és egy irányban *n = 100 db.* szemcse helyezhető el – *n* = *115,47 × 115,47 × 100 –1,33 ×* 10^6 *db.*, ezért a szemcsék összes térfogata *0,6981 m³*, következésképpen a hézagtérfogat V_h = *301.9 liter/m³*.

A gömb alakú szemcsékből álló halmazok hézagtérfogatának szélső értékei a fenti számítások szerint: *302 – 476 liter/m³*. A száraz szemcsékből álló halmazban a szemcsék elhelyezkedése a 69/a – 69/b ábra szerinti szélső esetek között várható, 70 – *80°* illeszkedési szöggel. A megfelelően nedvesített és jól tömörített halmazoké viszont megközelítheti az α = *60°* illeszkedési szöget is.



69. ábra

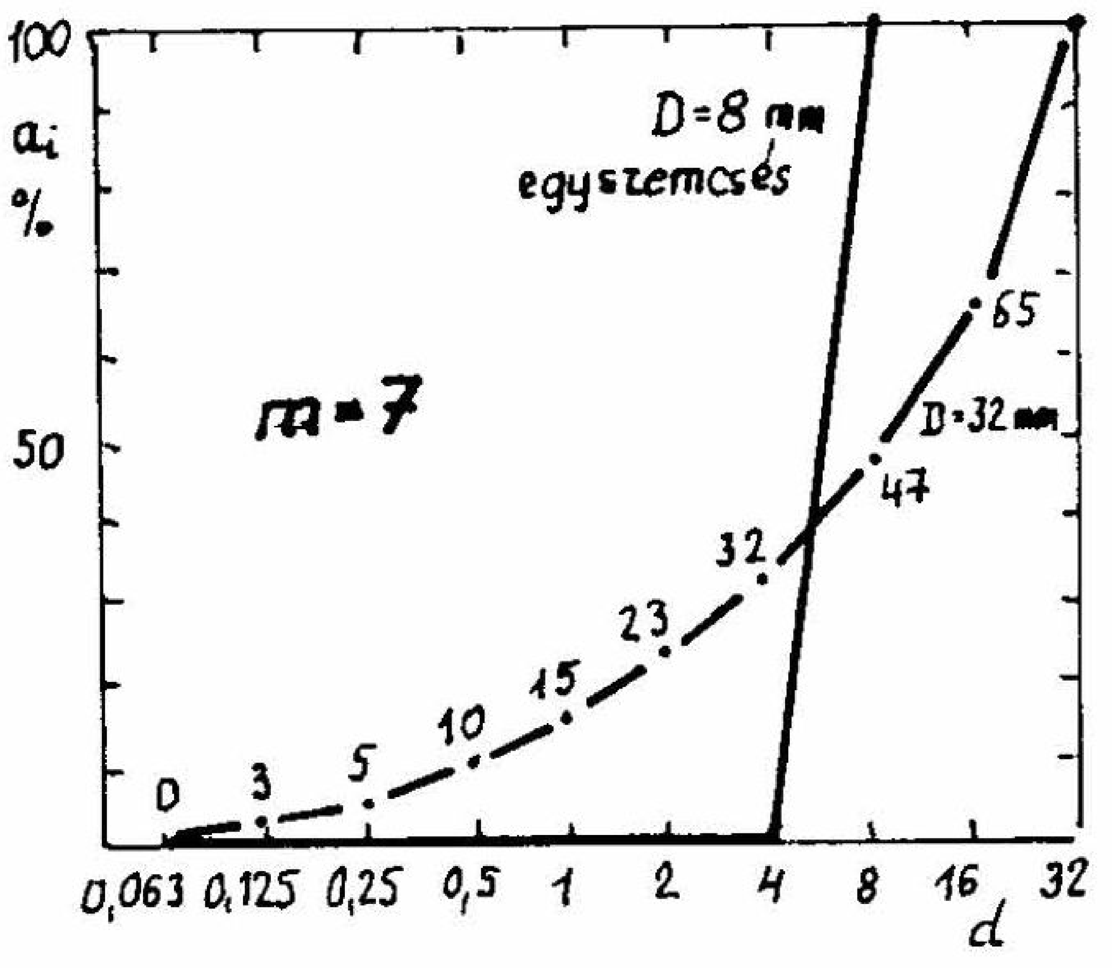
Kísérleteim szerint egyszemcsés dunai kavicsból képzett halmazok hézagtérfogata (= pépigénye) a *FN* konzisztenciánk megfelelő vízmennyiséggel keverve és HILTI-kalapáccsal tömörítve a (64) első tagjának megfelelően

$$V_{po,40} = 340 + 50 \times lg(m/4) \ \ liter/m^3 \qquad (122)$$

és ez feltételezhetően azzal magyarázható, hogy bár a kavicsszemcsék nem gömbalakúak, de vibropréselés mellett a nedves halmaz közel a legtömörebb állapotot éri el.

A hézagtérfogatot befolyásoló tényezők között a betontechnológiai kutatásban általában a *D* és az *m* értékét találták legfontosabbnak, míg a talajmechanikában *U* értékét.

Adott *D* mellett sokféle szemeloszlást lehet előállítani azonos finomsági modulussal (lásd 54. ábrát), ill. ugyanolyan finomsági modulusú szemcsehalmaz alakítható ki változó *D* mellett, ahogyan azt példaképpen a 70. ábra mutatja. Mindkét esetben (54. és 70. ábra) az eltérő graduáltság az *U* egyenlőtlenségi együtthatóval fejezhető ki, amelynek legkisebb értéke egyszemcsés adalékanyagra *U = 1,5* s bármilyenmás graduáltságra *U > 1,5.* Megjegyzendő, hogy azonos graduáltságú, de eltérő szemnagyságú halmazok egyenlőtlenségi együtthatója *D*-vel arányos, tehát az *U* a *D* hatását is tartalmazza.



70. ábra

THANH [87] *D = 4 mm* homokbetonnal végzett vizsgálatai eredményeképpen a száraz betonkeverék hézagtérfogatát

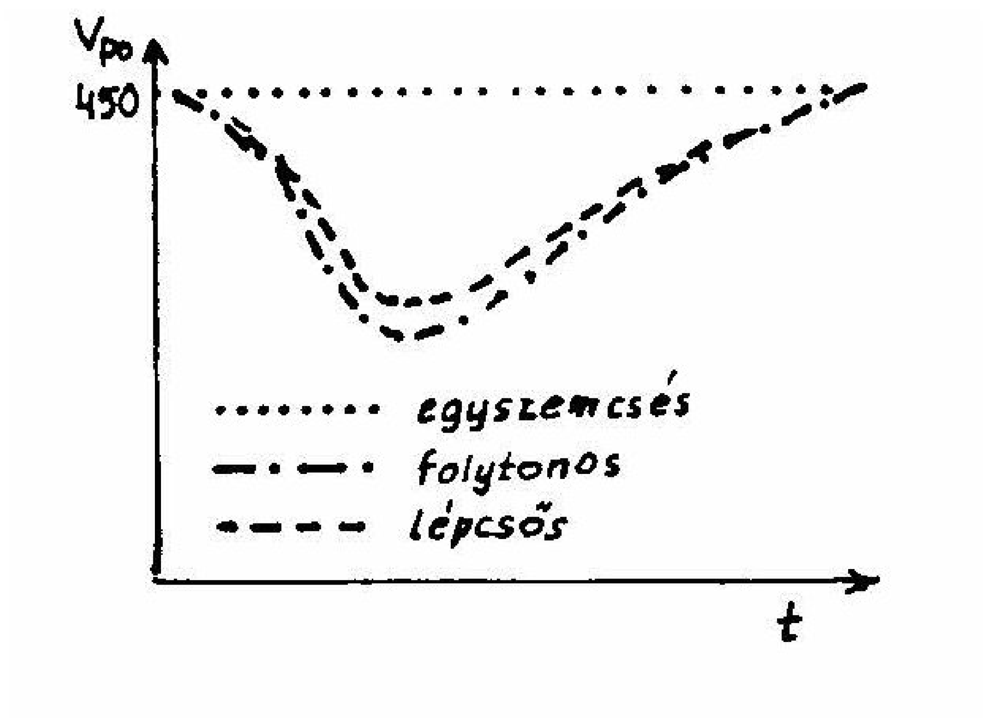
$$V_H = 450 - t^3 \times e^{K(D \times t)} \qquad (123)$$

függvénnyel fejezte ki, ahol

t = az ún. finomsági tényező: $t = m_A / \sqrt{S}$; m_A = az Abrams-féle finomsági modulus; *S* =a homok fajlagos felülete, m²/kg,

D = a legnagyobb szemnagyság: $1\ mm \le D \le 4\ mm$,

K = a legnagyobb szemnagyságtól, a graduáltságtól és a *t* finomsági tényezőtől függő érték.

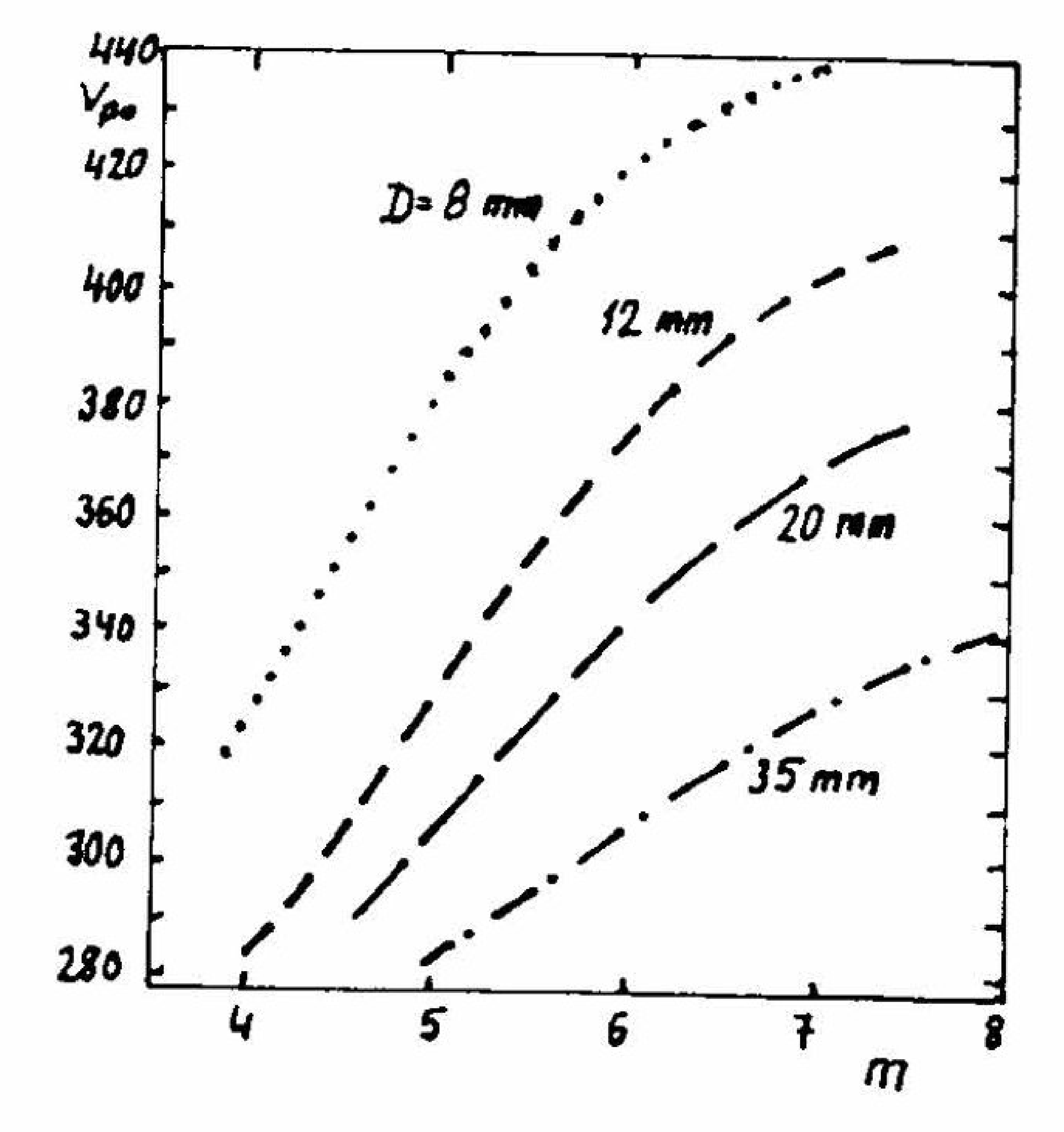


71. ábra

A (123)-ból számítható V_H = V_{po} a 71. ábra szerint hullámfüggvény jellegű összefüggést ad a finomsági tényező függvényében [v.ö. a (61) képlettel] képlékeny homokbetonokra értelmezve, és ezért minden bizonnyal értékét az adalékanyag víztartó képessége is befolyásolja.

A zúzottkő adalékanyag hézagtérfogatát ZSIGOVICS [88] vizsgálta és az alábbi összefüggést határozta meg:

$$V_H = A - \frac{a \times \ln U}{b + (m - c)^2} \quad liter/m^3 \qquad (124)$$



72. ábra:

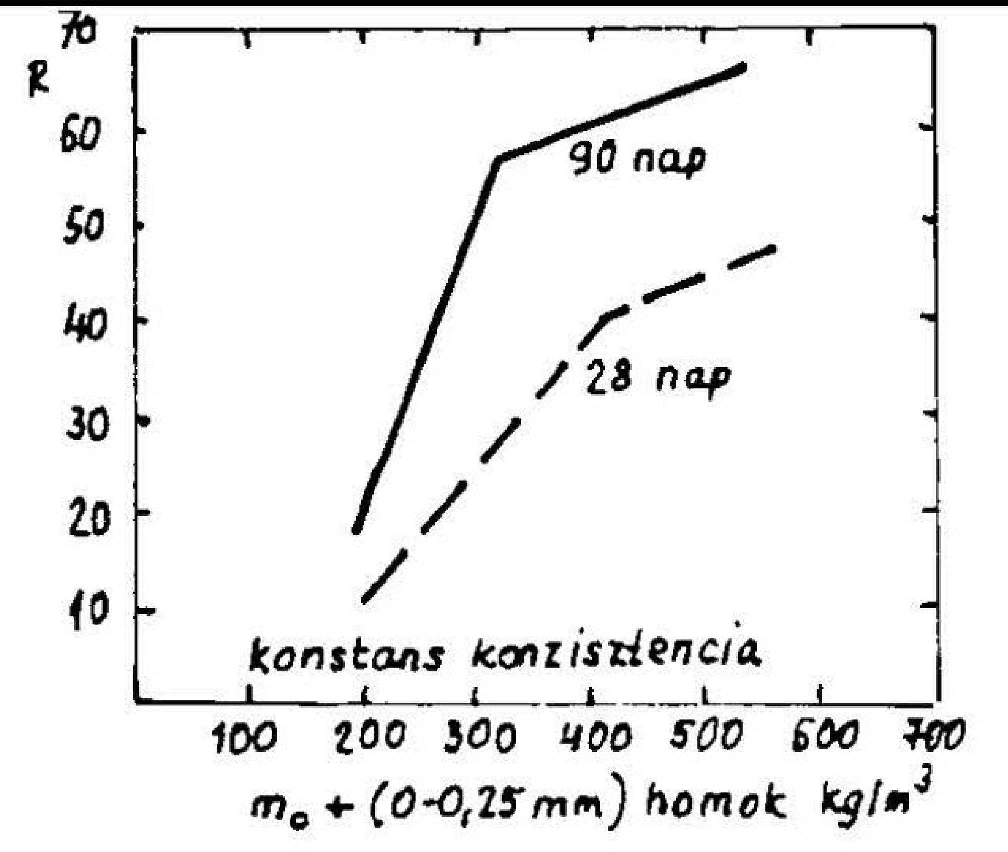
ahol *A, a, b* és *c* a *D*-től függő kísérleti állandók az alábbiak szerint:

D, mm	8	12	20	25
A	460	440	410	380
A	98,4	187,8	197,9	296,3
B	1,9	3,5	4,7	8,8
C	3,8	3,75	3,8	3,8

A (124) képletből *m* és *D* függvényében, *D = 8, 12, 20* és *35 mm*-re rendre *U = 15, 20, 25* és *30* értékeket felvéve, a 72. ábra szerinti V_H = V_{po} értékek számíthatók. Megjegyzendő, hogy ZSIGOVICS (124) összefüggése is hullámfüggvény-jellegű görbét ad, a legkisebb hézagtérfogatokat *m = c* mellett lehet elérni, míg *c* < *m* < *c* mellett a V_H egyaránt növekszik.

A [86]–[88], valamint a [48] alatti kutatások eredményeit értekezésem 4.2.–4.3. fejezeteinek eredményeivel összehasonlítva az állapítható meg, hogy a képlékeny adalékanyag-keverékek tömörségére kapott adatok tendenciájukban megegyeznek; a *T = f (D, m, U)* összefüggés hullámfüggvénnyel írható le. A képlékeny keverékek tömörségének a változását azonban a víztartó képesség is befolyásolja, ahogyan ezt a 4..2. fejezetben kifejtettem, ezért csak *FN* konzisztencia mellett állhat fenn V_{po} és V_H egyenlősége, lágyabb konzisztencia mellett $V_{po} < V_H$ várható, különösen nagyobb finomsági modulusok mellett.

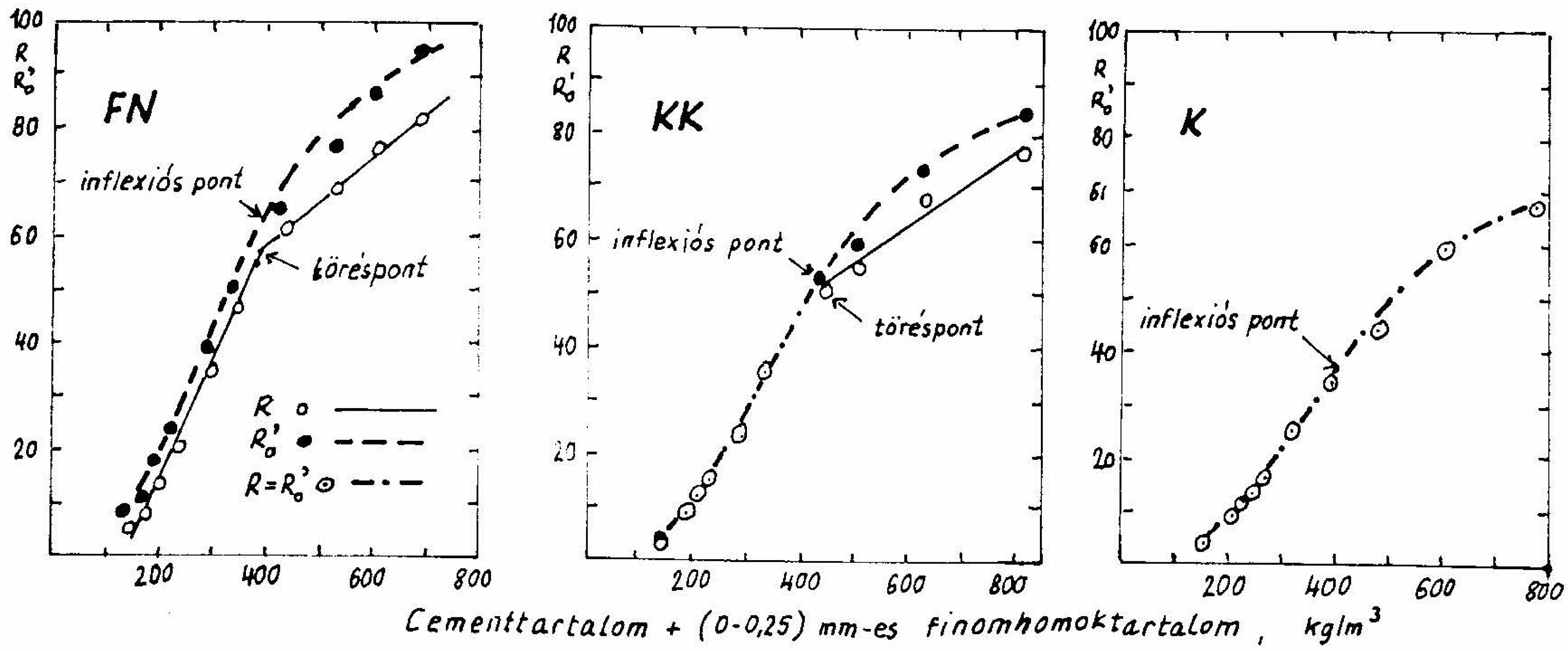
A péptartalomnak a nyomó-, ill. a húzószilárdságra gyakorolt hatását BALÁZS több esetben is vizsgálta [89], [90], és azt állapította meg, hogy (idézet): *„az azonos konzisztencia-mérőszámú, azonos korú betonok nyomószilárdságai, jó közelítéssel, olyan egyenesen fekszenek, amelynek töréspontja van, ha a szilárdságot a finomrésztartalom (cement + 0,25 mm-nél kisebb adalékanyag) függvényében ábrázoljuk”.* Jellegzetes összefüggései közül egyet a 73. ábrán mutatok be *(D = 16 mm, m = 8,4; U ~ 14, homokos kavics)*. Az ábra szerint 28 napos korban $m_c + m_{fh}$ ~ $400\ kg/m^3$ –nél (90 napos korban ~ 300 kg/m^3 –nél) töréspont tapasztalható. Hasonló eredményekhez jutott THANH is [87], aki azt állapította meg, hogy ez a töréspont V'_p > V_{po} mellett észlelhető, és ebből határozta meg az ún. gyakorlati telítettség fogalmát. Véleménye szerint a cementadagolás és a szilárdság a gyakorlati telítettségű homokbeton-keverékekre a legkedvezőbb. BALÁZS feltételezte [89], hogy az „optimális” finomrésztartalom (cement + finomhomok) a konzisztencia függvénye.



73. ábra

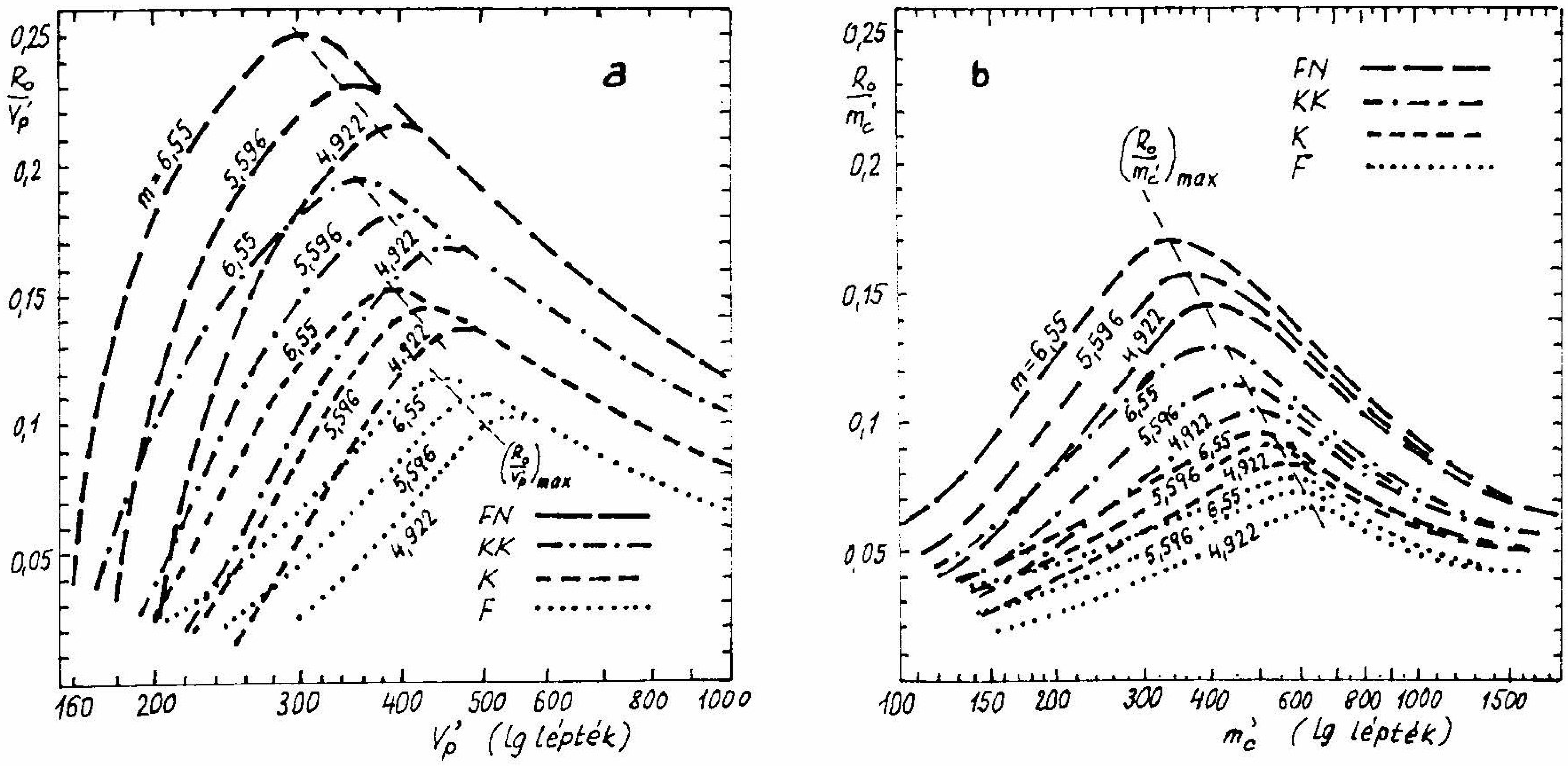
Az 5. táblázat adataiból néhányat (m = 6,55) a 74. ábrán a 73. ábrának megfelelően dolgoztam fel. Az ábrán feltüntettem a mért *R (MPA)*, valamint a tömör betonra átszámított R'_o *(MPa)* értékeit. BALÁZS feltételezését [89] a finomrésztartalom – szilárdság konzisztenciától való függésére vizsgálataim is igazolják. Eredményeim szerint azonban töréspont az *FN* és a *KK* konzisztenciájú betonokra csak akkor jelentkezik, ha az adatokat *R* függvényében szerkesztjük meg. Ennek az az oka, hogy a

nagyobb cementtartalmú *FN* és *KK* konzisztenciájú keverékek ragacsossá válnak, a szokványos laboratóriumi tömörítőeszközökkel nehezebben dolgozhatók be, és ezért bizonyos cementtartalmak fölött V_{lb} értéke általában növekszik. A töréspont ennek a következménye. Ha a tömör betonra átszámított R_o nyomószilárdságnak és a cementtartalomnak az összefüggését vizsgáljuk, akkor töréspont helyett inflexiós pont alakul ki az $m_c - R_o$ függvényben. BALÁZS egyébként helytálló megállapítása így pontosítható.



74. ábra

Az inflexiós ponthoz tartozó péptartalom, ill. cementtartalom egyértelműen meghatározható, ha az egységnyi térfogatú péppel, ill. egységnyi tömegű cementtel elérhető nyomószilárdságokat határozzuk meg, azaz a pép-, ill. cementtartalom függvényében R_o / V'_p , ill. R_o / m'_c értékeit ábrázoljuk. Az 5. táblázat adataira ezek az összefüggések a 75. ábrán láthatók: a 75/a ábrán R_o / V'_p és a 75/b ábrán R_o / m'_c értékei vannak feltüntetve.



75. ábra

A péptartalom hatását az 50., 53. és az 56. ábrák mutatják, amelyek egyrészt azt igazolják, hogy változatlan víz-cement tényező mellett mindig a telített beton a legnagyobb nyomószilárdságú, másrészt ezek az ábrák azt is bizonyítják, hogy változatlan konzisztencia mellett mindig a legnagyobb péptartalmú keverékkel lehet a legnagyobb nyomószilárdságot elérni.

Ha viszont azt vizsgáljuk, hogy egységnyi térfogatú cementpéppel mikor lehet a legnagyobb viszonylagos szilárdságú keveréket készíteni, akkor ezt a 75/a ábráról lehet leolvasni. Az adatok a következők:

m	*FN*	*KK*	*K*	*F*
6,55	335	360	400	445
5,596	375	405	440	500
4,922	410	460	480	540

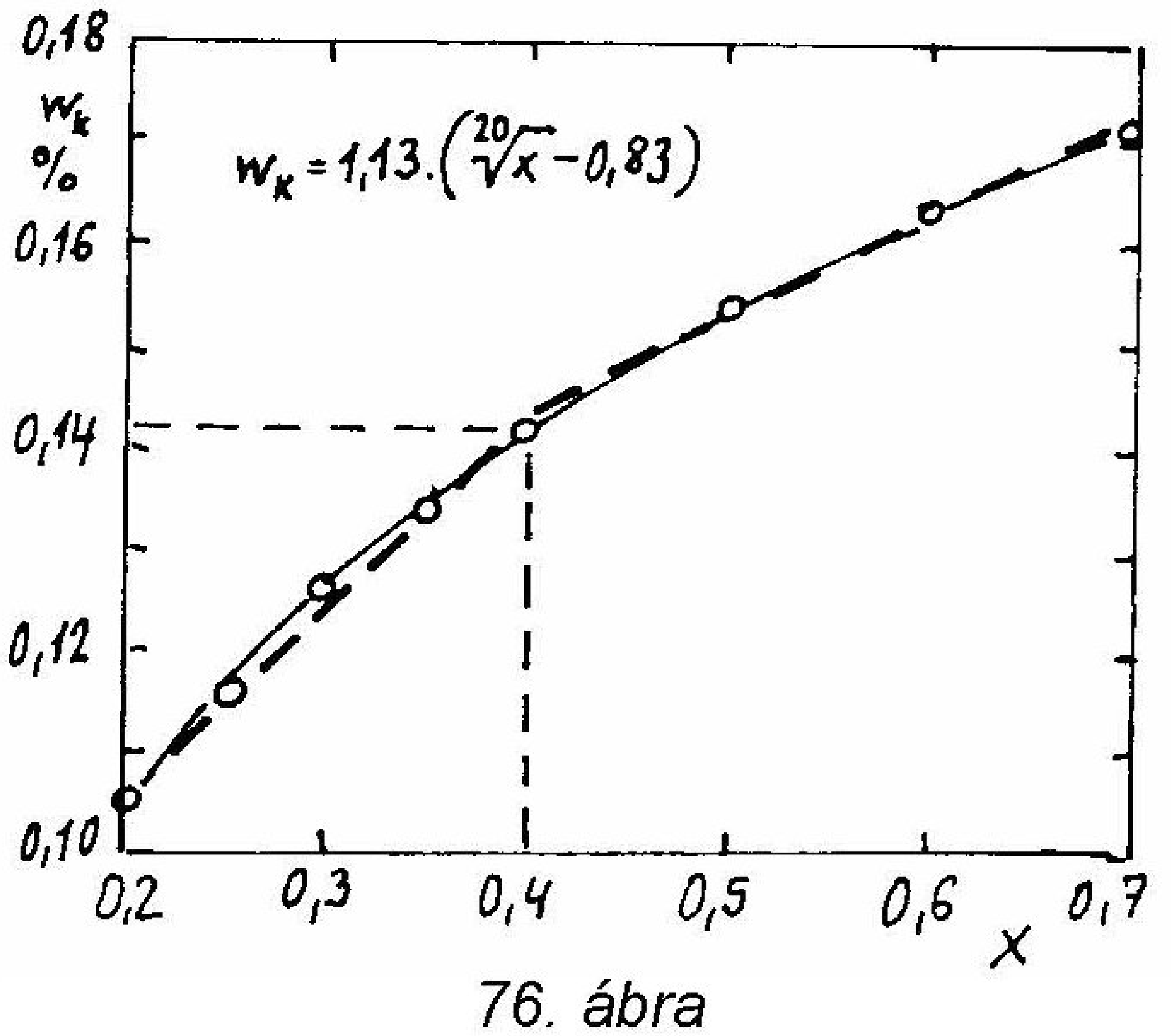
Ezek az értékek jó közelítéssel a legnagyobb péptartalmú túltelített betonkeverékek az 50. ábra szerinti értelmezésben. Ennek az a magyarázata, hogy adott konzisztencia elérésére ettől a péptartalomtól kezdve kell jelentősen fokozni a vízadagolást, amelyet ettől kezdve jobban befolyásol a cement-, minta az adalékanyag-vízigény {lásd 15. ábra, ill. a (39) – (40) képletek}, és a fokozott hígítás a viszonylagos nyomószilárdságot csökkenti.

A cementtartalom hatását egyrészt BALÁZS [89] vizsgálataiból származó 73. ábra és az 5. táblázatból szerkesztett 74. ábra, másrészt a 75/b ábra mutatja. A 73. – 74. ábrákból megállapítható, hogy a cementtartalom növelésével kezdetben erőteljesebben, később mérsékeltebben növekszik a nyomószilárdság; adott konzisztencia mellett a legnagyobb nyomószilárdság a legnagyobb cementtartalommal érhető el.

A 75/b ábráról viszont azok a cementtartalmak olvashatók le, amelyek mellett a viszonylagos nyomószilárdság (az 1 kg cementtel elérhető, MPa-ban kifejezett nyomószilárdság) a legnagyobb. Ezek a cementtartalmak (kg/m^3) az alábbiak. Az 5. táblázat szerint ezeknek a cementtartalmú betonoknak a víz-cement tényezője jó közelítéssel $x = 0,4$.

m	*FN*	*KK*	*K*	*F*
6,55	340	410	460	570
5,596	380	460	540	620
4,922	430	500	580	660

Az, hogy a legnagyobb viszonylagos nyomószilárdság az adalékanyag minőségétől és a konzisztenciától függetlenül $x \sim 0,4$ víz-cement tényezővel érhető el, a cement hidratációjának és a víz-cement tényezőnek az összefüggésével magyarázható. TAPLIN [73] adataiból a 28 napos korban kötött víztartalomra meghatározott (92) képlet szerint ugyanis $x < 0,4$ mellett w_k értéke fokozottabban csökken, mint amilyen mértékben $x > 0,4$ mellett növekszik. Ezt a 76. ábráról lehet leolvasni: folytonos vékony vonal ábrázolja a TAPLIN adataiból számított w_k értékeket, a szaggatott vonal ezek kiegyenlítését; a kiegyenlítő vonalnak $x = 0,4$ függőlegesében van a töréspontja. Ebből arra lehet következtetni, hogy $x < 0,4$ mellett a cement hidratációja 28 napos korban a nyomószilárdságra gyakorolt hatását tekintve észrevehetően csökken, továbbá azt is fel lehet tételezni, hogy a cementkő vázban diszlokációk keletkezhetnek a növekvő hidratációs hő miatt.



76. ábra

BALÁZS 73. ábrán közölt adatai szerint feltételezhető, hogy idősebb korban a korai mérsékeltebb hidratáció még számottevőbb hatású, mivel kisebb cementtartalomhoz nagyobb víz-cement tényező tartozik, ha a konzisztencia változatlan.

Itt is fel kell hívnom a figyelmet értekezésem 6.2. fejezetében közölt vizsgálati eredményeimre: a *FN-KK* cementpépek nyomószilárdsága normális (+20 °C) tárolás mellett az *x* csökkenésével csökken, és csak akkor lehet növekvő pépszilárdságot nyerni, ha a tárolási hőmérsékletet mérsékeljük, elkerülve ezzel a hidratációs hő okozta diszlokációkat. Feltételezhető, hogy az $x < 0,4$ víz-cement tényezőjű betonkeverékek szilárdulása kezdeti tárolási hőmérséklettel fokozható.

8. A BETONSTRUKTÚRA TERVEZÉSE

A beton többfázisú anyag, amely szilárd alkotókból (homok, durva adalékanyag, hidratálatlan és hidratált cement), pórusokból (gélpórus, kapilláris pórus, légpórus), és azokat részben, vagy egészben kitöltő szabad vízből áll [1]. Ennek következtében szövetszerkezetének több szintjét lehet megkülönböztetni: a cementkő szerkezetét (mikrostruktúra), a cementkő és a finomhomok elegyének, a habarcsváznak a szerkezetét (mezostruktúra), végül a habarcsváz és a durva adalékanyag együttesének, a betonnak a szerkezetét (makrostruktúra). Leegyszerűsítve, de gyakorlati célokra még használ-

hatóan, a beton makroszinten olyan kétfázisú anyagnak tekinthető, amelyben az adalékanyag különböző méretű inert szemcséi a cementkővázba vannak beágyazódva.

Értekezésemben a betonstruktúra alatt ezt a leegyszerűsített makrostruktúrát értem, amelyet az adalékanyagváz, a cementkőváz és a pórusok (kapilláris és légpórusok) alkotnak.

A korábbi fejezetekben a beton nyomószilárdságát befolyásoló tényezőket, ezek hatását a péptelítettség-fogalomból kiindulva vizsgáltam, amelyet a beton V'_p péptartalmának és az adalékanyag V_{po} pépigényének $\Delta V'_p$ különbsége fejez ki. A péptelítettség a beton makrostruktúráját meghatározó valamennyi lényeges jellemzőt tartalmazza, mert

- a térfogatban kifejezett V'_p péptartalom a cement V'_c tömör térfogatának és a keverővíz V'_w térfogatának az összege a hiánytalanul tömörített betonban, adott bedolgozhatóság (konzisztencia) mellett, tehát a még hidratálatlan cementkőváz által elfoglalt tér;
- a keverővíz V'_w térfogatának szükséges mennyiségét az adalékanyagváz geometriai jellemzői, valamint a cement őrlésfinomsága határozzák meg, továbbá a V'_w térfogatból a cementtartalom ismeretében következtetni lehet a megszilárdult beton kapilláris pórusainak a térfogatára;
- a V_{po} pépigény függ az adalékanyag szemeloszlását jellemző m finomsági modulustól és a graduáltságot jellemző, a D legnagyobb szemnagyság hatását is tartalmazó U egyenlőtlenségi együtthatótól, tehát az adalékanyagváz struktúrájától, továbbá a betonkeverék konzisztenciájától;
- a $\Delta V'_p$ pépkülönbség az adalékanyagváz pépigényének és a cementpép-tartalomnak a különbsége térfogatban kifejezve; ha negatív előjelű $(V'_p < V_{po})$, akkor kifejezi a betömörített friss beton levegőtartalmát.

A betontechnológiai kutatásban kapott eredmények értékeléséhez a pételítettség-fogalom különböző elemeit korábban is figyelembe vették. Ide sorolhatók a következők:

- a cementtartalom hatásának az elemzése, mert a cementtartalom a péptartalommal trendkapcsolatban van, ill. azonos konzisztencia mellett egyenes arányban áll a péptartalommal;
- az adalékanyag-tartalom hatásának a vizsgálata, mert a telített-túltelített tartományban a pép rendelkezésére álló teret, tehát lényegében a péptartalmat jellemzi (mértékét térfogat %-ban, vagy liter/m^3-ben fejezik ki);
- az $n = m_a / m_c$ arány alkalmazása a beton tulajdonságait szabályozó paraméterként, amely közel áll a péptelítettség fogalomhoz: minél kisebb n, annál inkább túltelített a betonkeverék. Amíg azonban állandó m_a és m_c mellett az n arány a beton egyéb jellemzőitől függetlenül állandó, addig $\Delta V'_p$ állandó n mellett is változik az adalékanyag jellemzőitől és a konzisztenciától függően.

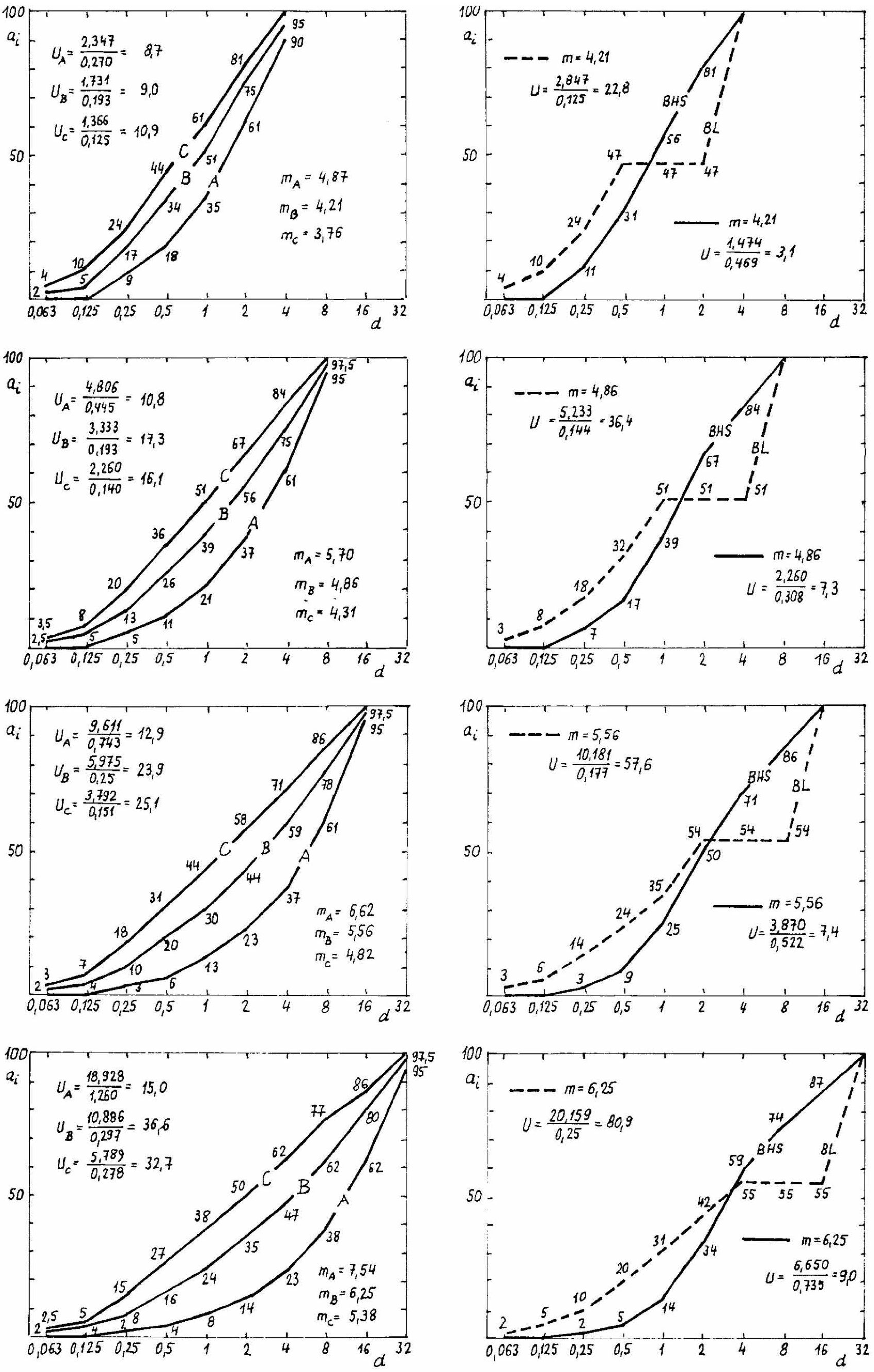
A hazai előírások szerint [91] – [92] a $D = 4, 8, 16$ és $32\ mm$ legnagyobb szemnagyságú betonadalékanyagok szemeloszlási határgörbéi a 77. ábrának megfelelőek (baloldali ábrasor). A 77. ábrán feltüntettem a „*B*" görbék finomsági modulusaira illeszkedő lépcsős (*BL*) és homokszegény (*BHS*) szemeloszlásokat is (jobboldali ábrasor): A 77. ábra különböző szemeloszlásaihoz tartozó U értékeket tájékoztatásul a 78. ábrán, a kissé képlékeny konzisztenciára érvényes V_{po} pépigényeket pedig a 79. ábrán az (58) – (60), ill. (64) – (65) képletekből számítva szerkesztettem meg.

Ha különböző szemeloszlású, $D = 16\ mm$-es homokos kavicsokkal $m_a = 1870\ kg/m^3$ és $m_c = 350\ kg/m^3$ összetételű, kissé képlékeny keverékeket készítünk, akkor az m_a / m_c arány mindig $n = 5{,}34$, de $\Delta V'_p$ értéke a 79. ábrából a 77. ábra szerinti *A, BHS, B, BL* és *C* szemeloszlások mellett rendre: *+61, +31, +45, +61* és *+76* , a péptartalom / pépigény viszonya pedig – ugyanebben a sorrendben - : *1,29; 1,12; 1,29; 1,35* és *1,25.* Az n értéke csak a száraz alkotók keverési arányát fejezi ki, a péptelítettség viszont a struktúráz alkotó összetevőkét.

A betonkeverék makro- és mikrostruktúráját egyaránt befolyásolja az m_c cement-, és az m_w víztartalom, ill. ezek $x = m_w : m_c$ aránya, a víz-cement tényező, amelynek első szabatos vizsgálata tudomásom szerint ZIELINSZKY nevéhez fűződik [93], aki $m_w : m_c$ arányát %-ban fejezte ki és hatását 1, 2, 4, 13, 26 és 52 hetes korban határozta meg 30-60 % ($x = 0{,}3 – 0{,}6$) tartományban.

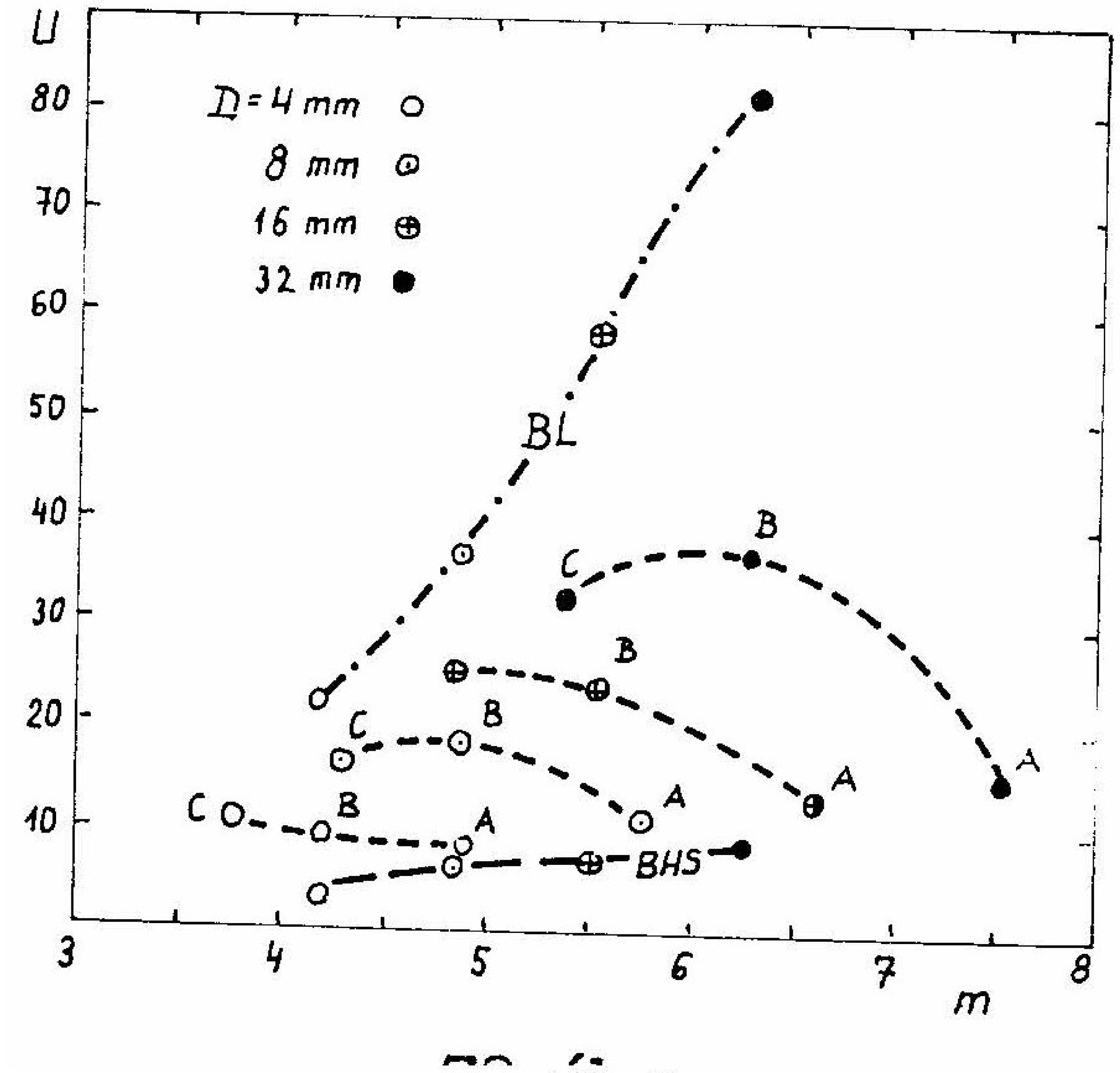
Az x víz-cement tényező azonban a nyomószilárdságot a cement- és a víztartalomtól, ill. ezek térfogatösszegét kifejező V'_p péptartalomtól függően befolyásolja. Az x csökkenésével csökken a cementpép hígítása, tehát csökken a megszilárdult és kiszárított cementkőváz V_l pórustartalma, de a csökkenés mértéke nem független a cementtartalomtól. A V_l pórustartalom várható értékét csak közelíteni lehet; a TAPLIN [73] adataiból meghatározott (92) képlettel 28 napos korra becsült értékeket a 80. ábra tartalmazza. A 80/a ábra a friss állapotban pórusmentes betonokra ($V'_p \geq V_{po}$), a 80/b ábra a

V_{po} = 250 *liter/m*^{3} pépigényű homokos kaviccsal készített, jól tömörített betonokra foglalja össze V_l elméleti (teljes tartományra vonatkoztatott) és gyakorlati adatait. A 80/b ábra értékei a péphiány okozta levegőtartalom miatt trének el a 80/a ábráétól; kezdetben a növekvő *x* növeli a víztartalmat, ezért csökken a péphiány, ami a friss beton, ill. ezáltal a megszilárdult beton pórustartalmát is csökkenti.

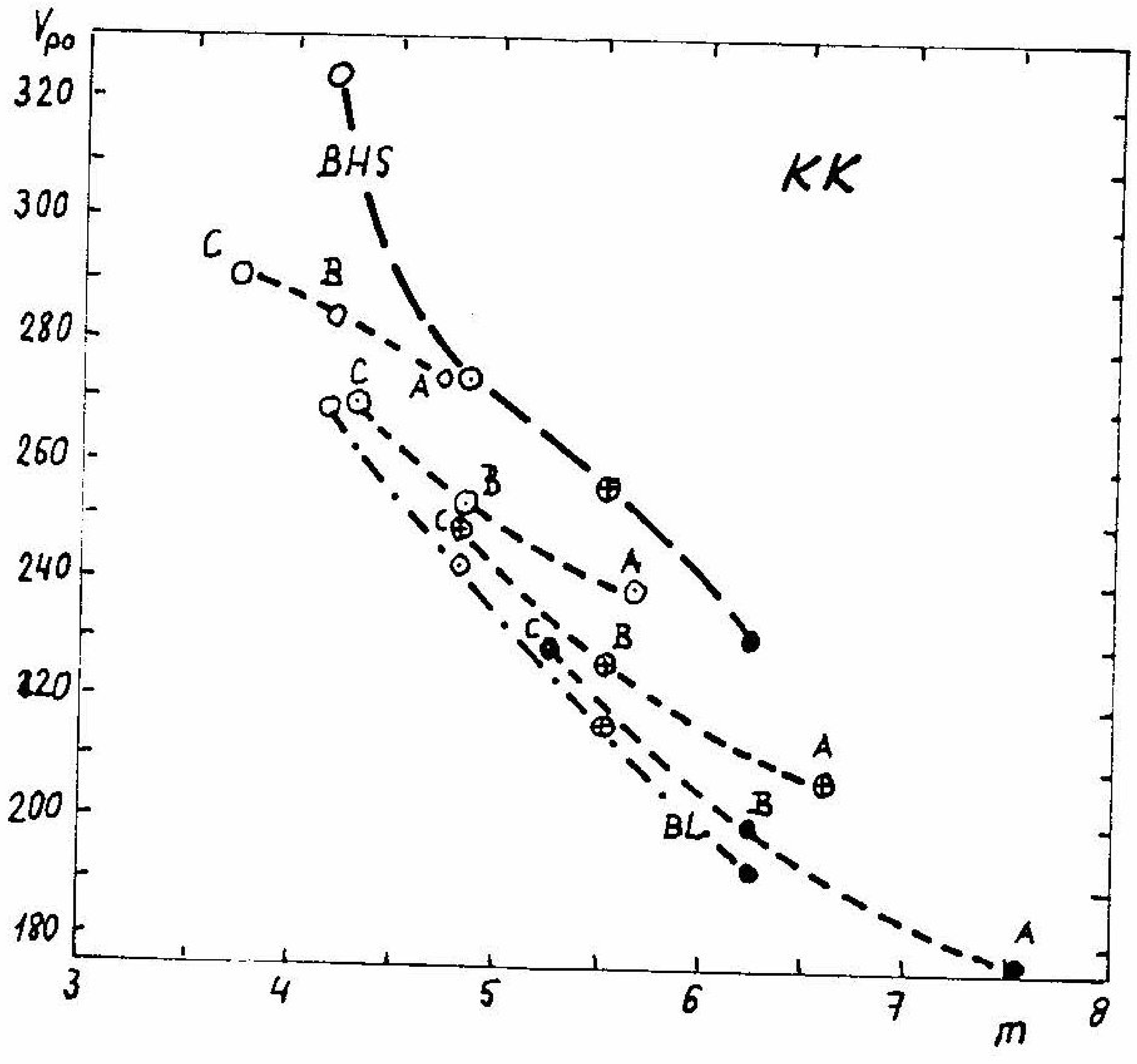


U_A = 2,347/0,270 = 8,7
U_B = 1,731/0,193 = 9,0
U_C = 1,366/0,125 = 10,9
m_A = 4,87
m_B = 4,21
m_C = 3,76
m = 4,21
U = 2,847/0,125 = 22,8
m = 4,21
U = 1,474/0,469 = 3,1
BHS
BL
U_A = 4,806/0,445 = 10,8
U_B = 3,333/0,193 = 17,3
U_C = 2,260/0,140 = 16,1
m_A = 5,70
m_B = 4,86
m_C = 4,31
m = 4,86
U = 5,233/0,144 = 36,4
m = 4,86
U = 2,260/0,308 = 7,3
U_A = 9,611/0,743 = 12,9
U_B = 5,975/0,25 = 23,9
U_C = 3,792/0,151 = 25,1
m_A = 6,62
m_B = 5,56
m_C = 4,82
m = 5,56
U = 10,181/0,177 = 57,6
m = 5,56
U = 3,870/0,522 = 7,4
U_A = 18,928/1,260 = 15,0
U_B = 10,886/0,297 = 36,6
U_C = 5,789/0,278 = 32,7
m_A = 7,54
m_B = 6,25
m_C = 5,38
m = 6,25
U = 20,159/0,25 = 80,9
m = 6,25
U = 6,650/0,735 = 9,0
a_i
d

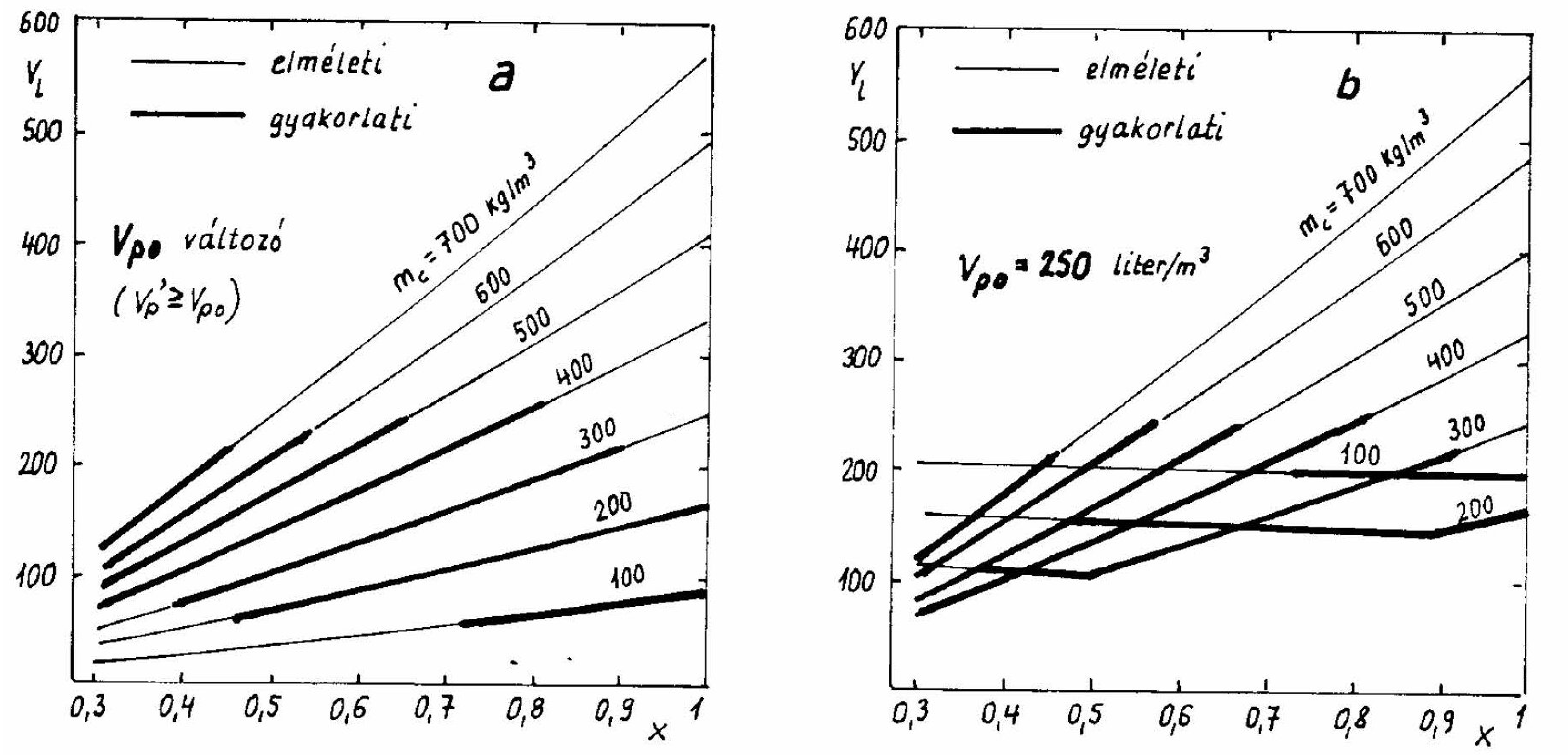
77. ábra



78. ábra



79. ábra

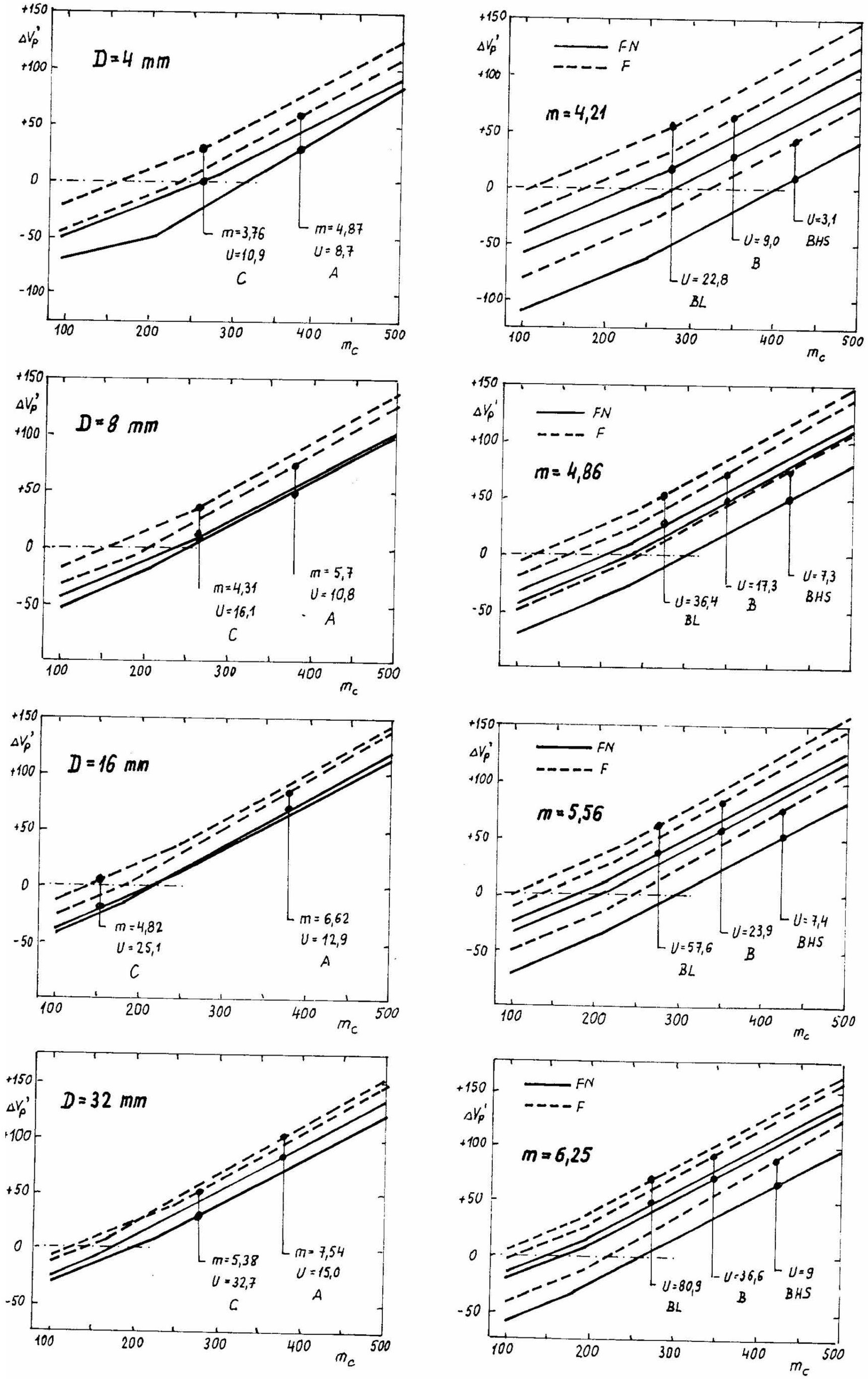


80. ábra

A 80. ábrából lehet következtetni arra, hogy adott V_{po} = *250 liter/m*^{3} pépigényű adalékanyaggal készítve milyen cementtartalom mellett várható változatlan víz-cement tényezővel a legkisebb pórustartalmú, tehát a legnagyobb nyomószilárdságú beton. A 80/b ábra adataiból pl. $x = 0,9$ és m_c = *200 kg/m*^{3} , vagy $x = 0,5$ és m_c = *300 kg/m*^{3} az összetartozó értékpárok.

A beton makrostruktúrája $\Delta V'_p$ értékével is jellemezhető. A 81. ábrán a 77. ábrán megadott adalékanyagokkal készített, különböző cementtartalmú, földnedves és folyós konzisztenciájú betonkeverékek $\Delta V'_p$ értékeit tüntettem fel. Megjegyzem, hogy a *KK* és *K* betonok különböző cementtartalmak mellett várható $\Delta V'_p$ értékei, a két határeset *(FN* és *F)* között, egymástól csak kis távolságban helyezkednek el.

Minthogy az 50. ábrának megfelelően, adott víz-cement tényező mellett, a telített keverékek nyomószilárdsága a legnagyobb, ezért adott adalékanyaghoz célszerű lenne olyan cementtartalmat választani, amely a telített keveréknek megfelelő. Erre azonban ritkán van lehetőség, mert a szokványos adalékanyagokkal (lásd 77. ábra) az $x \sim 0,7$ víz-cement tényezőjű telített betonokat is csak *FN* konzisztenciával lehet készíteni, az ennél kisebb víz-cement tényezőjű telített beton pedig már alig földnedves, vagy ennél is merevebb konzisztenciájú, tehát tömöríthetetlen.



D = 4 mm
m = 3,76
U = 10,9
C
m = 4,87
U = 8,7
A
m = 4,21
FN
F
U = 22,8
BL
U = 9,0
B
U = 3,1
BHS
D = 8 mm
m = 4,31
U = 16,1
C
m = 5,7
U = 10,8
A
m = 4,86
U = 36,4
BL
U = 17,3
B
U = 7,3
BHS
D = 16 mm
m = 4,82
U = 25,1
C
m = 6,62
U = 12,9
A
m = 5,56
U = 57,6
BL
U = 23,9
B
U = 7,4
BHS
D = 32 mm
m = 5,38
U = 32,7
C
m = 7,54
U = 15,0
A
m = 6,25
U = 80,9
BL
U = 36,6
B
U = 9
BHS
$\Delta V_p'$
m_c

81. ábra

Az adalékanyag szemeloszlását azonban lehet módosítani: növekvő cementtartalomhoz (= csökkenő víz-cement tényezőhöz) egyre nagyobb pépigényű, és egyre kisebb vízigényű adalékanyagot célszerű választani annak érdekében, hogy a $\Delta V'_p$ minél kisebb legyen. Ehhez ad segítséget a 81. ábra, ill. a korábban közölt 59. – 61. ábra (előző a cementtartalom és a szemeloszlás, utóbbi a víz-cement tényező kiválasztását segíti elő).

A telített beton cementtartalmát számítani is lehet a 4. tervezési sémán (46. lap) megadott alábbi képletből:

ha $m_{co} \leq m_{c1}$, akkor:

$$m_{co} = (V_{po} - m_{wo}) \times 3{,}1 \quad kg/m^3 \tag{125}$$

ha $m_{co} > m_{c1}$, akkor:

$$m_{co} = \frac{V_{po} + m_{c1}\dfrac{\Delta m_w}{2\Delta m_c} - m_{wo}}{\dfrac{1}{3{,}1} + \dfrac{\Delta m_w}{2\Delta m_c}} \quad kg/m^3 \tag{126}$$

ahol Δm_c és Δm_w értékei a (36)–(37)–ből számíthatók.

A betonösszetétel, ill. a betonstruktúra tervezésekor nem szabad figyelmen kívül hagyni, hogy az értekezésemben megadott módszer is, mint az irodalomban található minden más módszer, laboratóriumi vizsgálatokra támaszkodik. A laboratóriumi vizsgálatokba olyan adalékanyagokat is be kell vonni, amelyek a gyakorlatban nem használhatók (pl. csekély a víztartó képességük), továbbá olyan konzisztenciájú keverékeket is kell készíteni, amelyek csak speciális eszközökkel (pl. vibropréseléssel) tömöríthetők. Ez a szélső esetek ellenőrzése érdekében szükséges, de emiatt a tervezési módszerhez elengedhetetlen a gyakorlati alkalmazás határainak a kijelölése.

Értekezésem 3. fejezetében foglalkoztam az adalékanyagváz tömörségével, ill. pépigényével. A (67) és a (66) képlet különbségéből, tehát a tömörség, ill. a pépigény alapján számított adalékanyag-térfogatok különbségéből lehet következtetni az adalékanyag víztartó képességére: Ha a (66)-ból számított V_{ao} kisebb, min a (67)-ből számított érték, akkor a víztartó képesség nem kielégítő, az adalékanyag használta kisebb cementtartalom (m_c < $300\ kg/m^3$) mellett nem célszerű, a belőle készített beton nem tömöríthető kielégítően és hajlamos a vérzésre.

A 77. ábrán megadott szemeloszlásokra kiszámítottam V_{ao} értékeit a (66) és a (67) képletekkel, és az alábbi adalékanyagokat találtam kedvezőtlennek:

D	m	U	V_{ao} (66)	V_{ao} (67)	ΔV_{ao}
8	5,7	10,8	731	741	– 10
16	6,62	12,9	745	772	– 27
	5,56	7,4	715	724	– 9
32	7,54	15	750	804	– 54
	6,25	9	729	749	– 20

A fenti adatok alapján az előírások szerinti *„A"* szemeloszlásokat $D \geq 16$ *mm* mellett nem ajánlatos alkalmazni m_c < $300\ kg/m^3$ cementtartalmú betonokhoz, mert bár a struktúra szempontjából kedvezőek, de kedvezőtlen bedolgozhatóságúak.

A beton struktúrájának a kialakulását úgy is lehet értelmezni, hogy az adalékanyag szemcséit a cementkőváz ragasztja össze. A ragasztástechnikából ismert [94], hogy a legjobb ragasztóhatást a ragasztandó anyaggal egyenlő, vagy annál nagyobb szilárdságú ragasztóanyag gyakorlatilag még kialakítható minimális vastagsága hozza létre. A tömör cementkőváz szilárdsága kizárólag x-től függ, telítetlen betonban azonban a tömör cementkőváz létrehozása kétséges, mert a $V_{po} - V'_p$ értékű levegőtartalom feltételezhetően fellazítja a cementpépet. A cementkő, mint ragasztóanyag, gyakorlatilag kialakítható minimális vastagsága a telített betonban jön létre, de tömör cementkőváz csak akkor várható, ha a beton konzisztenciája a betonozási feltételekhez (szerkezet vastagsága, a vasalás sűrűsége, tömörítő eszköz) illeszthető. Ha a megfelelő konzisztenciát telített betonkeverékkel nem lehet elérni, akkor növelni kell a cementkőváz vastagságát (az adalékanyaghoz viszonyított térfogatát), de ennek ellensúlyozására növelni kell a cementkőváz szilárdságát a víz-cement tényező csökkentére révén. Gazdaságossági szempontból a víz-cement tényező alsó határértéke, szokványos betonkészítési feltételek mellett, $x \sim 0{,}4$ (lásd a 7.6. fejezetet).

A struktúra tervezése a péptelítettség fogalomból kiindulva tehát azt jelenti, hogy

- meg kell határozni a készítendő beton szükséges konzisztenciáját és nyomószilárdságát, továbbá a keverék ehhez illeszkedő péptartalmát;
- meg kell tervezni az adalékanyag geometriai jellemzőit annak érdekében, hogy a betont kis mennyiségű vízzel lehessen elkészíteni (ehhez minél nagyobb finomsági modulus szükséges) és pépigénye ne térjen el nagymértékben a szükséges péptartalom becsült értékétől (kis cementtartalomhoz kisebb, nagy cementtartalomhoz nagyobb pépigényű adalékanyag kedvezőbb);
- ellenőrizni kell, hogy a tervezett szemeloszlású adalékanyaggal megfelelő bedolgozhatóságot , kielégítő víztartó képességet, vérzés- és szétosztályozódás-mentességet lehet-e elérni;
- ha a tervezett szemeloszlás a technológiai feltételeket nem elégíti ki, akkor úgy kell az adalékanyagot módosítani, hogy a vízigény lehetőleg ne változzék, a pépigény pedig ne térjen el nagy mértékben a becsült péptartalomtól (ha a finomsági modulus változatlan, akkor *U* csökkenésével nő, növelésével csökken a pépigény, de a vízigény nem változik).

9. ÚJ TUDOMÁNYOS EREDMÉNYEK

Értekezésem a beton-nyomószilárdság péptelítettség fogalomra alapozott vizsgálatának az eredményeit, az eredmények értékelését és következtetéseimet tartalmazza. Új tudományos eredményeimet a következőkben foglalom össze:

9.01. A beton szükséges víztartalma

Adott konzisztenciájú beton vízigényét az adalékanyag w_a (tömegrész) és a cement w_c (tömegrész) vízigénye szabja meg.

Az adalékanyag vízigénye az *m* finomsági modulustól és a konzisztenciától függ (vizsgálataimban a k_s konzisztencia mérőszámot használtam, amely a vízzel kevert szemcsés halmaz víztartóképességét fejezi ki *s*-ban, 50 Hz vibrálás mellett):

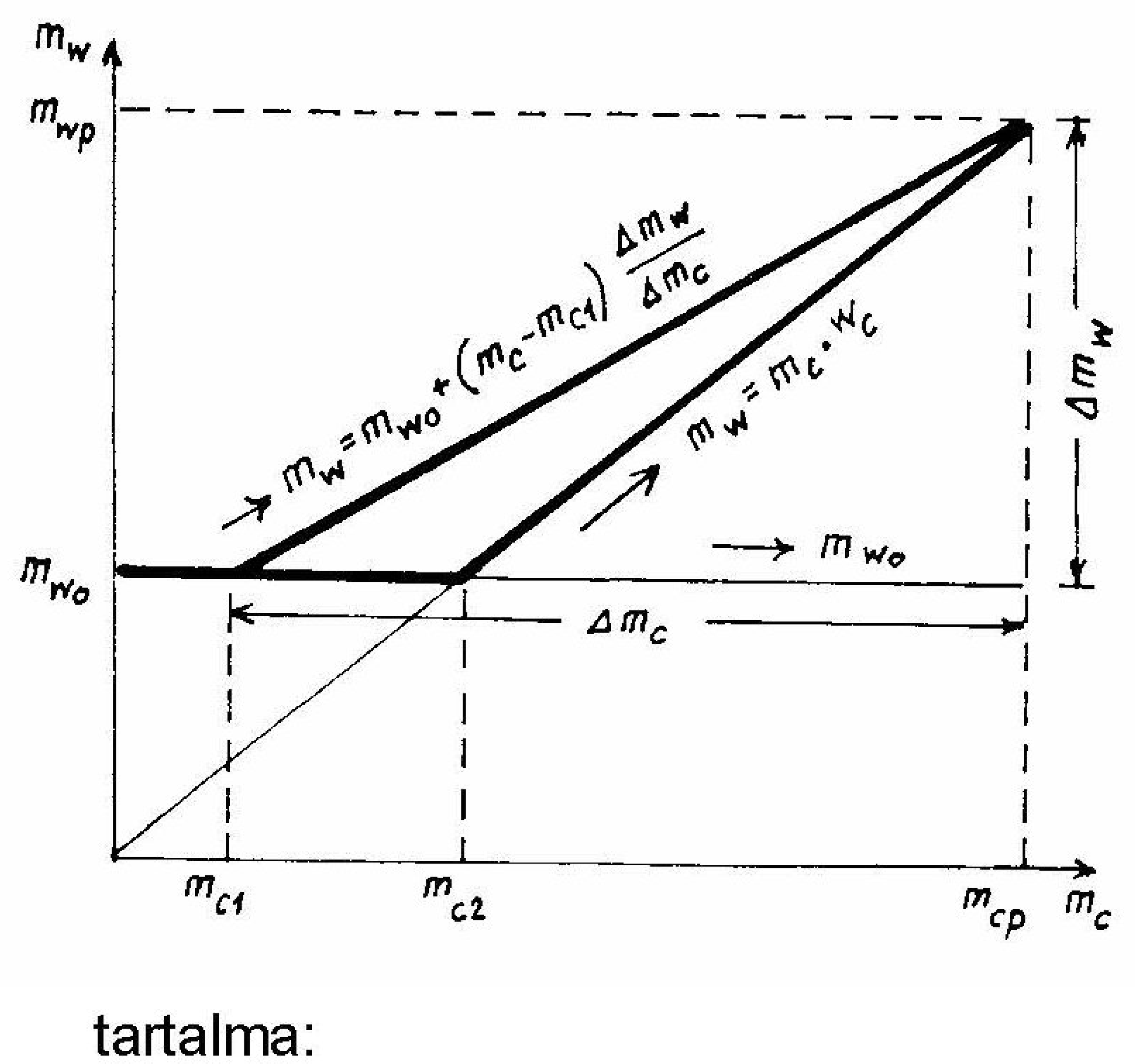
$$w_a = A \times e^{-B \times m} \quad \textit{tömegrész} \qquad \text{(I)}$$

ahol $A = 0,3 \times \exp[-0,22 \times (0,1 \times k_s)^{0,35}]$ és

$B = 0,17 \times \exp[0,13 \times (1,0 \times k_s)^{0,32}]$

A cement vízigénye az *S* m^2/kg fajlagos felülettől és a k_s konzisztencia mérőszámtól függ:

$$w_c = [0,3 + 0,00028 \times (s - 100)] \times e^{-0,35 \times (0,1 \times k_s)^{0,25}} \quad \textit{tömegrész} \qquad \text{(II)}$$



Az adott konzisztenciájú keverékek két határesete: az adalékanyag + víz és a cement + víz keveréke. A száraz alkotók mennyisége e két határeset között változhat, a keverékek víztartalom-változásának a szélső értékei a mellékelt ábra szerint alakulnak (vastag vonallal jelölve). Az ábrán három jellegzetes cementtartalom található:

- m_{c1} = az a legnagyobb cementtartalom, amely mellett a szükséges víztartalmat kizárólag az adalékanyag vízigénye szabja meg:

$$m_{c1} = m_{c2} / 3 \quad kg/m^3 \qquad \text{(III)}$$

- m_{c2} = az a cementtartalom, amelyre fennáll, hogy $m_{wo} = m_{c2} \times w_c$, tehát $m_{c2} = m_{wo} / w_c \quad kg/m^3$ (IV)
- m_{cp} = az adott konzisztenciájú cementpép cementtartalma:

$$m_{cp} = 1000 / \{(1/3,1) + w_c\} \quad kg/m^3 \qquad \text{(V)}$$

Az ábrán a következő jellemző víztartalmakat lehet találni:

- m_{wo} = az adott konzisztenciájú (víztartóképességű) adalékanyag + víz keverék, ill. az $m_c \le m_{c1}$ cementtartalmú betonkeverékek szükséges víztartalma:

$m_{wo} = m_{ao} \times w_a$ kg/m^3 (VI)

- ❖ m_{wp} = az adott konzisztenciájú pép szükséges víztartalma $m_{wp} = m_{cp} \times w_c$ kg/m^3 (VII)

Az ábrán a következő jellemző különbségeket lehet találni:

- Δm_w =az adott konzisztenciájú cementpép és az adalékanyag+víz keverék szükséges víztartalmának a különbsége: $\Delta m_w = m_{wp} - m_{wo}$ kg/m^3 (VIII)
- Δm_c = az adott konzisztenciájú cementpép cementtartalmának és az m_{c1} cementtartalomnak a különbsége: $\Delta m_c = m_{cp} - m_{c1}$ kg/m^3 (IX)

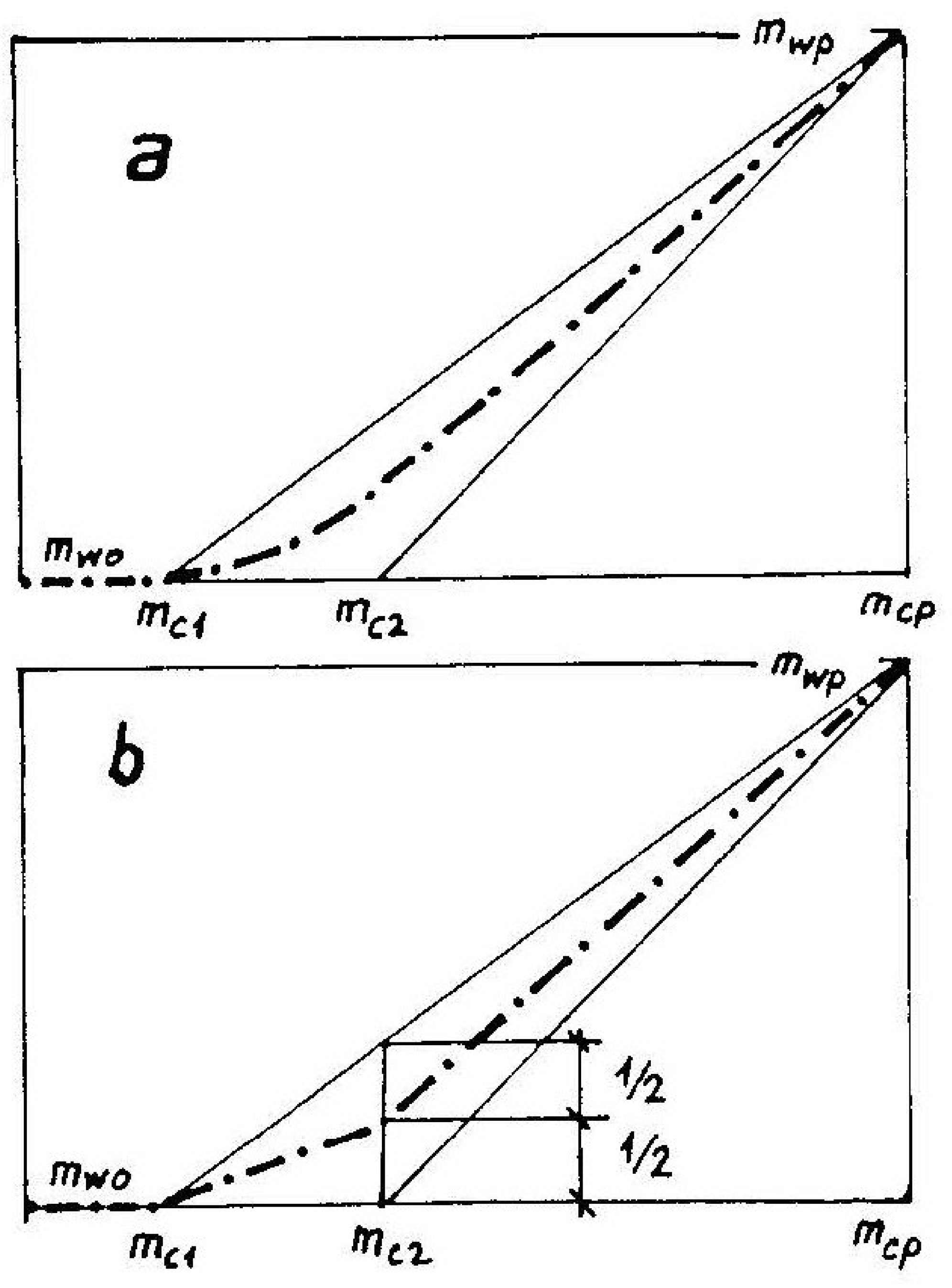
Az ábrán a következő jellemző egyenesek szerkeszthetők meg:

- o az m_{wo} – hoz tartozó vízszintes egyenes a (VI) szerint,
- o az $m_w = 0$ és az $m_w = m_{wp}$ pontokat összekötő ferde egyenes, amelynek egyenlete:

$m_w = m_c \times w_c$ kg/m^3 (X)

- o az m_{c1} és m_{wo} metszéspontját az m_{wp} ponttal összekötő ferde egyenes, amelynek egyenlete:

$m_w = m_{wo} + (m_c - m_{c1}) \times (\Delta m_w / \Delta m_c)$ kg/m^3 (XI)



Vizsgálataim azt bizonyították, hogy adott konzisztenciájú, különböző cementtartalmú betonkeverékek víztartalma $m_c > m_{c1}$ mellett olyan görbére illeszkedik (lásd a mellékelt ábra ***a*** részét), amely egyenesekkel jól helyettesíthető (lásd a mellékelt ábra ***b*** részét). Az egyenesek töréspontja az m_{c2} függőlegesében az m_{wo} vízszintes és a (X) szerinti ferde egyenes közötti függőleges távolság felezőpontjában található. Az ábrának megfelelően $m_{c1} \le m_c \le m_{c2}$ cementtartalom mellett a betonkeverék szükséges víztartalma:

$$m_w = m_{wo} + \frac{(m_c - m_{c1}) \times \left(\frac{\Delta m_w}{\Delta m_c}\right)}{2} \quad kg/m^3 \qquad \text{(XII)}$$

míg $m_c > m_{c2}$ cementtartalmak mellett:

$$m_w = m_{wo} + \frac{(m_c \times w_c - m_{wo}) + (m_c - m_{c1}) \times \frac{\Delta m_w}{\Delta m_c}}{2} \quad kg/m^3 \qquad \text{(XIII)}$$

9.02. A homokos kavics tömörsége és pépigénye

A tömörített száraz, vagy nedves halmazok tömörségét a szemcsék által elfoglalt tér fejezi ki. A nedves halmazokat addig kellene tömöríteni, amíg a legnagyobb tömörséget el nem érik, de csak addig szabad, amíg a vízleadás meg nem kezdődik. Ezért a nagyobb nedvességtartalmú, képlékeny adalékanyag + víz (vagy adalékanyag + kevés cement + víz) keverékek tömörítésekor nem lehet mindig elérni a teljes tömörséget.

A tömörséget az adalékanyag *m* finomsági modulusa, a víztartóképességet - s ezen keresztül a tömörséget – *U* egyenlőtlenségi együtthatója befolyásolja. Vizsgálataim bizonyították, hogy a képlékeny (k_s ~ 2) homokos-kavics halmazok tömörsége:

$$V_{ao} = 650 + \lg(U - 0{,}5) \times \frac{64}{16 + (m-7)^2} \times 22 \quad liter/m^3 \qquad \text{(XIV)}$$

hullámfüggvénnyel jól közelíthető.

A szemcsék nedves halmazával, megfelelő tömörítéssel (pl. vibropréseléssel) általában elérhető a teljes tömörség, ha a halmaz merev. Vizsgálataim bizonyították, hogy az *AFN* (k_s = 40) konzisztenciájú homokos kavics + víz keverékeknek a tömörsége:

$$V_{ao,40} = \left(660 - 50 \times \lg \frac{m}{4}\right) + 38 \times e^{-\frac{2}{U-0,5}} \times \left(m - 1,54 \times e^{\frac{1}{U-0,5}}\right) \quad liter/m^3 \qquad (XV)$$

Adott U mellett az m-től függő egyenesekkel jól közelíthető.

Adott szemeloszlású, jól tömörített homokos kavicsban a cementpép rendelkezésére álló tér minimuma: $V_{po} = 1000 - V_{ao}$ *liter/m*^{3}. Ezt neveztem el az adalékanyag pépigényének. Ebből következik, hogy az *AFN* konzisztenciájú homokoskavics–beton pépigénye a (XV) átalakításával:

$$V_{po,40} = \left(340 - 50 \times \lg \frac{m}{4}\right) - 38 \times e^{-\frac{2}{U-0,5}} \times \left(m - 1,54 \times e^{\frac{1}{U-0,5}}\right) \quad liter/m^3 \qquad (XVI)$$

Vizsgálataim bizonyították, hogy a $k_s < 40$ konzisztencia–mérőszámú homokos kavics keverékek pépigénye:

$$V_{po,s} = V_{po,40} + 45 \times e^{-0,1 \times k_s} \quad liter/m^3 \qquad (XVII)$$

A betonkeverékek akkor vannak cementpéppel telítve (telített betonok), ha az adott konzisztenciájú, jól tömörített beton cementpép tartalma:

$$V'_p = V_{po,s} \quad liter/m^3 \qquad (XVIII)$$

A beton *telítetlen*, ha $V'_p < V_{po}$ *liter/m*^{3} (XIX)

A beton *túltelített*, ha $V'_p > V_{po}$ *liter/m*^{3} (XX)

A (XIV)-ből a vízleadás kezdetéig tömörített homokos kavics halmazok tömörsége számítható képlékeny $(k_s \sim 2)$ konzisztenciára. A teljesen tömör halmaz mértékadó térfogata ugyanilyen konzisztencia mellett a (XVII) átalakításával a (XV)-ből: $V_{ao,2} = V_{ao,40} - 45 \times e^{-0,1 \times k_s}$ és mivel $k_s = 2$, ezért:

$$V_{ao,2} = V_{ao,40} - 37 \quad liter/m^3 \qquad (XXI)$$

Ha a (XIV)-ből számított $V_{ao} < V_{ao,2}$, akkor az adott szemeloszlású homokos kavics víztartó képessége nem kielégítő, ezért $m_c < 300$ *kg/m*^{3} cementtartalmú *K* vagy *F* betonokhoz nem használható.

9.03. A bedolgozott friss beton légtartalmának hatása a nyomószilárdságra

A hiányos tömörítés miatt a bedolgozott friss telített vagy túltelített betonban V_{lb} *liter/m*^{3} levegő maradhat.. A légpórust is tartalmazó betonnak az *R* nyomószilárdságából a tömör $(V_{lb} = 0)$ beton várható nyomószilárdságát – vizsgálataim szerint – az alábbi egyenlettel lehet jó közelítéssel becsülni:

$$R_o = R \times e^{0,033 \times (0,1 \times V_{lb})^{1,3}} \quad MPa \qquad (XXII)$$

Ebből következik, hogy friss állapotban $V_{lb} > 0$ levegőt is tartalmazó beton *R* nyomószilárdsága a $V_{lb} = 0$ tömör beton R_o nyomószilárdságából

$$R_o = R \times e^{-0,033 \times (0,1 \times V_{lb})^{1,3}} \quad MPa \qquad (XXIII)$$

egyenlettel számítható.

Ha a beton telítetlen, akkor friss állapotban $V_{lb} = 0$ mellett is tartalmaz $V_l = V_{po} - V_p$ *liter/m*^{3} levegőt, ezért a telítetlen beton R_o nyomószilárdsága $V_{lb} = 0$ mellett is kisebb, mint az egyébként azonos víz-cement tényezőjű, de telített beton R'_o nyomószilárdsága az

$$R_o = R'_o \times e^{-0,033 \times (0,1 \times V_l)^{1,3}} \quad MPa \qquad (XXIV)$$

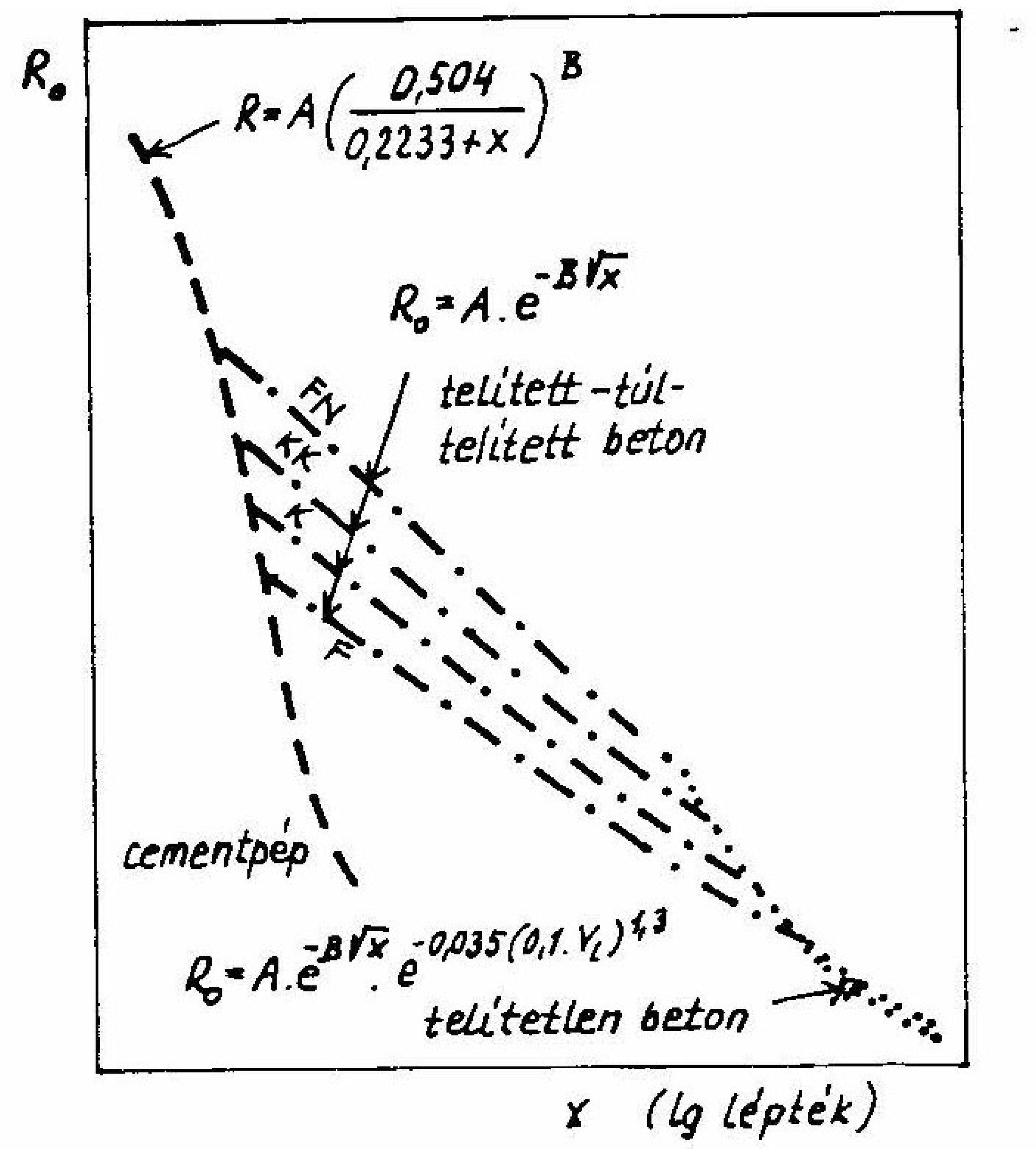
egyenletnek megfelelően:

9.04. Szilárdságbecslő függvények

Bizonyítottam, hogy az általánosan ismert és használt BOLOMEY, FERET, POWERS és ABRAMS-féle szilárdságbecslő függvények $V_l = 0$ mellett az *x* víz-cement tényező és a nyomószilárdság összefüggését fejezik ki.

Vizsgálataim bizonyították, hogy a FERET-féle szilárdságbecslő függvény, állandó hatványkitevője miatt, nem illeszthető egyértelműen a szilárdságvizsgálati eredményekre, míg a BOLOMEY-függvény sok esetben irreális eredményeket adhat $x > 1$ víz-cement tényezők mellett.

Bizonyítottam, hogy a POWERS és ABRAMS függvények általában jól illeszkednek bármilyen vizsgálatsorozatra, de a hazai cementekkel készített betonokra az ABRAMS-függvény korrelációja akkor kielégítő, ha x alapértéke helyett négyzetgyökét ($x^{0,5}$) vesszük figyelembe.



Vizsgálataim bizonyították, hogy a cementkötésű keverékek teljes tartományára nem lehet egyetlen függvénnyel közelíteni a szilárdságvizsgálati eredményekre illeszkedő görbéket, mert az x–R_o összefüggésnek három, egymástól jól elkülöníthető tartománya van, ahogy ezt a mellékelt ábra mutatja.

Az első tartomány a tiszta cementpépek tartománya, amelyre – vizsgálataim szerint – a POWERS-függvény jól illeszthető. A hazai 350-es cementekre:

$$R_o = 82 \times \left(\frac{0,504}{0,2233 + x} \right)^{3,2} \; MPa \qquad \text{(XXV)}$$

a hazai 450-es cementekre:

$$R_o = 98 \times \left(\frac{0,504}{0,2233 + x} \right)^{3,3} \; MPa \qquad \text{(XXVI)}$$

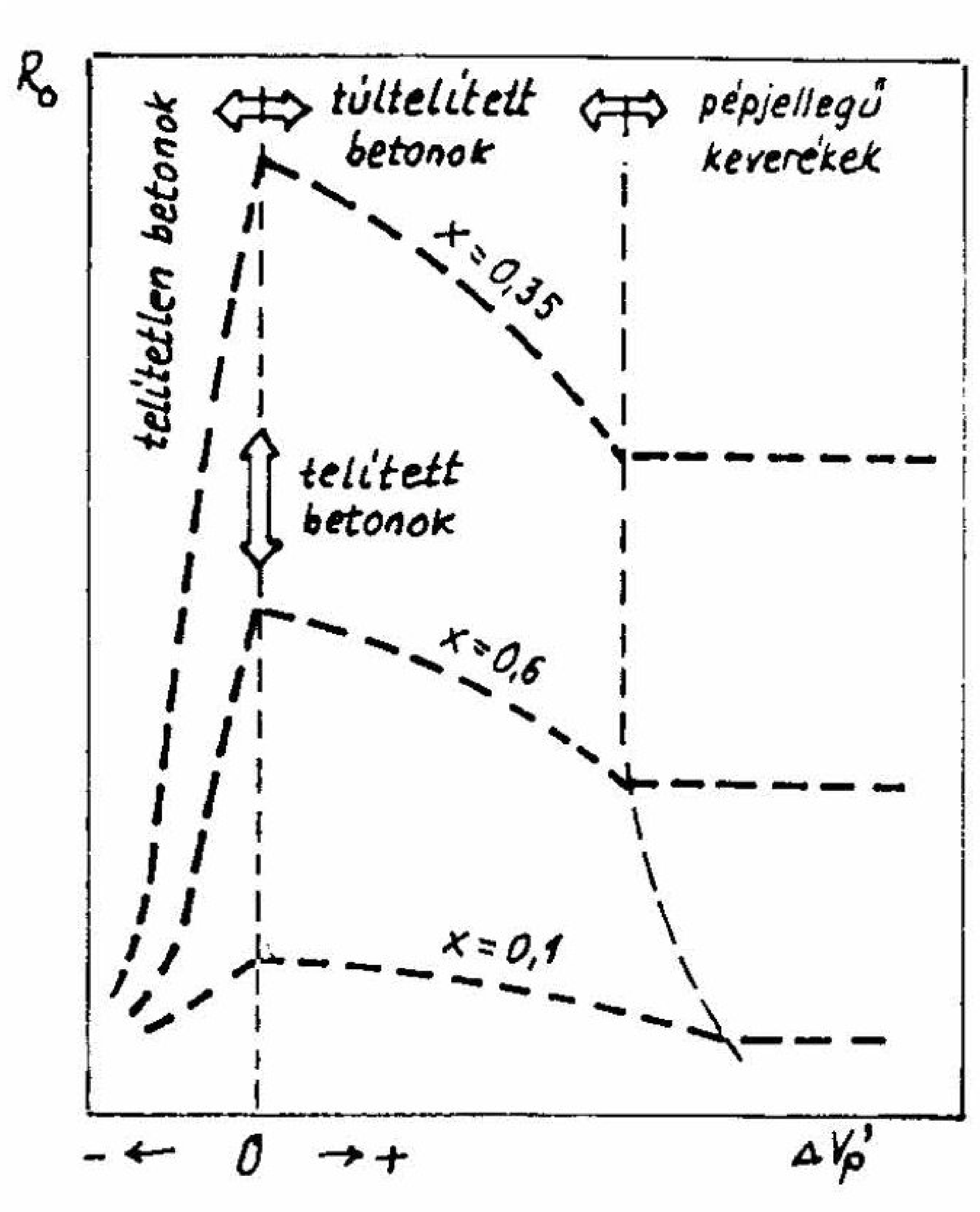
egyenlet ad jó közelítést.

A második tartomány a telített-túltelített betonkeverékek tartománya, legfeljebb a következő péptöbblettel: $\Delta V'_p = V'_p - V_{po} = 200 - 260$ *liter/m*^{3}. Erre a tartományra azonos cementet és adalékanyagot felhasználva, vizsgálataim szerint az ABRAMS-féle hatványfüggvény illeszthető, $x^{0,5}$ figyelembe vételével:

$$R_o = A \times e^{-B \times \sqrt{x}} \; MPa \qquad \text{(XXVII)}$$

de A és B értékeit a betonkeverék konzisztenciájától függően kell meghatározni.

A harmadik tartomány a telítetlen betonkeverékek tartománya, amelyek R_o elméleti nyomószilárdsága a (XXVII)-ből, míg $V_{lb} = 0$ mellett várható tényleges nyomószilárdsága a (XXIV)-ből jó közelítéssel becsülhető. Vizsgálataim bizonyították, hogy azok a túltelített betonkeverékek, amelyek cementtartalma közel egyenlő, vagy nagyobb, mint a (IV)-ből számított m_{c2}, az első tartományba tartoznak, tehát pépjellegű keverékeknek tekintendők, amelyek szilárdság a (XXV), vagy a (XXVI) egyenletből számítható.



9.05. A péptelítettség és a nyomószilárdság összefüggése

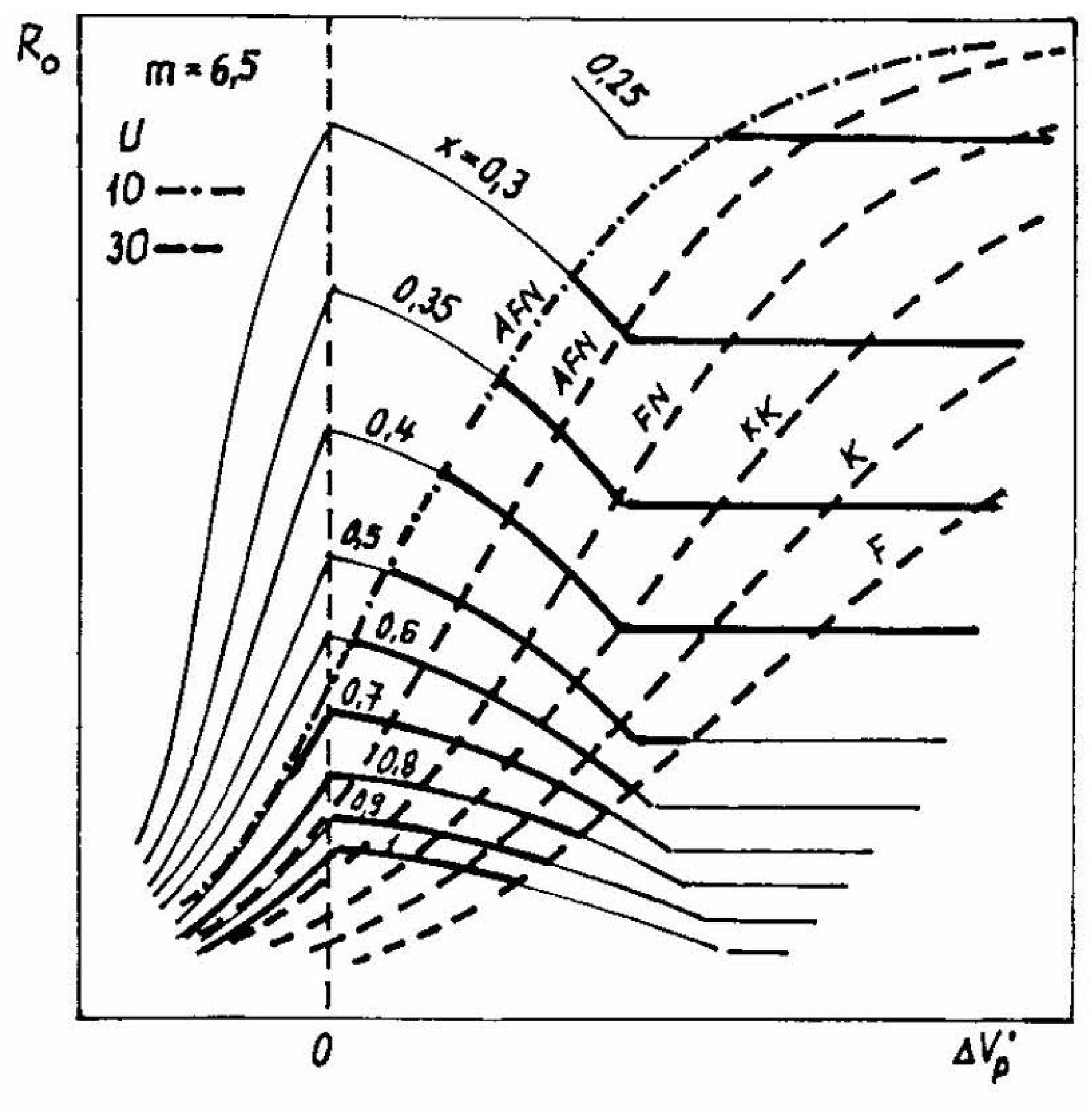
Vizsgálataim bizonyították, hogy adott víz-cement tényező mellett a nyomószilárdság a péptelítettségtől függően a mellékelt ábrának megfelelően változik, tehát

- a legnagyobb nyomószilárdságot, adott víz-cement tényező mellett, mindig a telített betonnal lehet elérni,
- a telítetlen betonok nyomószilárdsága rohamosan csökken a péphiány növekedésével,
- a túltelített betonok tartományában a péptartalom növekedése a nyomószilárdság csökkenését vonja maga után; kis víz-cement tényező mellett a csökkenés meredekebb, nagy víz-cement tényező mellett enyhébb,
- a pépjellegű keverékek tartományában a nyomószilárdság független a péptartalomtól: változatlan víz-cement tényez-

ző mellett a nyomószilárdság változatlan.

Vizsgálataim bizonyították, hogy főleg az $x \leq 0,26$ víz-cement tényezőjű, *FN-KK* konzisztenciájú pépjellegű keverékek tartományában a kötés, valamint a szilárdulás kezdeti szakaszában a szokványos +20 °C tárolási hőmérséklet a 28 napos nyomószilárdság értékét kedvezőtlenül befolyásolja, ezért az első 24 órában a próbatesteket +5 °C körüli hőmérsékleten célszerű tartani, megakadályozva a vízelpárolgást. A kedvezőtlen hatás feltételezhetően a hidratációs hő növekedése okozta diszlokációk következménye.

9.06. A szemeloszlás, a péptelítettség, a víz-cement tényező, a konzisztencia és a nyomószilárdság összefüggése ($m - U - \Delta V'_p - x - k_s - R_o$ kölcsönhatása)

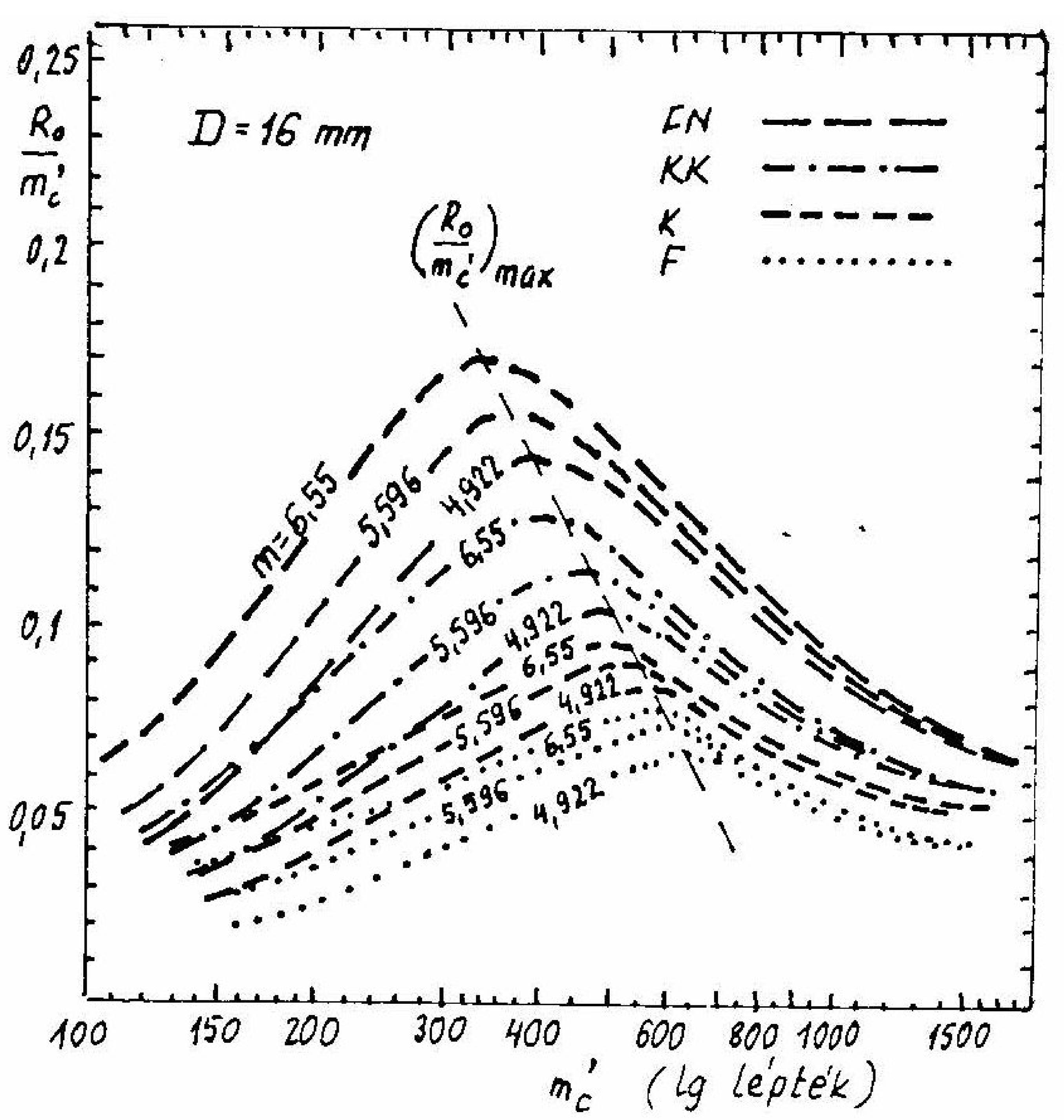


Vizsgálataim bizonyították, hogy az m-U-$\Delta V'_p$-x-k_s-R_o kölcsönhatását a mellékelt ábra jellemzi. Az ábrán az adott adalékanyag (*m* és *U*) felhasználásával elért eredményeket vastag vonallal, a teljes tartományban (bármely adalékanyaggal) elérhető eredményeket vékony vonallal jelöltem. Az m-U-$\Delta V'_p$-x-k_s-R_o kölcsönhatásának részletes vizsgálata alapján megállapítottam, hogy

- ❖ változatlan konzisztencia mellett növekvő péptartalomhoz növekvő nyomószilárdság tartozik; a legnagyobb nyomószilárdságot tiszta cementpéppel lehet elérni,
- ❖ változatlan konzisztencia és víz-cement tényező mellett azzal az adalékanyaggal lehet nagyobb nyomószilárdságú betont készíteni, amelynek pépigénye és a beton péptartalma közötti különbség kisebb. Ha $x < 0,6$, akkor általában a nagyobb pépigényű adalékanyag alkalmazása kedvezőbb,
- ❖ lágyuló konzisztencia mellett csak akkor lehet változatlan nyomószilárdságot tartani, ha csökken a víz-cement tényező és növekszik a péptartalom..

9.07. A betonösszetétel gazdaságossága

A betonösszetétel gazdaságossága az 1 kg cementtel elérhető, MPa-ban kifejezett nyomószilárdsággal jellemezhető. Vizsgálataim szerint az R_o / m'_c arány a mellékelt ábra szerint alakul. Ezek a vizsgálatok bizonyították, hogy



- az R_o / m'_c arány optimális értéke az adalékanyag szemeloszlásától és a beton konzisztenciájától függően változik. Az ábra szerinti adalékanyagokat felhasználva a legnagyobb R_o / m'_c az alábbi cementtartalmak mellett érhető el:

m	*U*	*FN*	*KK*	*K*	*F*
6,55	21,4	340	410	460	570
5,596	19,9	380	460	540	620
4,922	12.1	430	500	580	660

- az R_o / m'_c arány optimális értéke $x \approx 0,4$ víz-cement tényezőjű betonok készítésekor várható; ennek oka feltételezhetően az, hogy $x < 0,4$ mellett a cement hidratációja – szokványos tárolási hőmérsékletek mellett – mérséklődik.

A betonösszetétel gazdaságosság az 1 liter péptartalommal elérhető, MPa-ban kifejezett nyomószilárdsággal is jellemezhető. Vizsgálataim bizonyították, hogy az R_o / V'_p arány legkedvezőbb értéke a túltelített beton-tartomány felső határán lévő péptartalmakkal (azaz $m_c \approx m_{c2}$ cementtartalmakkal) várható.

9.08. A módosított víz-cement tényező

Vizsgálataim bizonyították, hogy az m-U-$\Delta V'_p$-x-k_s kölcsönhatásában kialakult R_o nyomószilárdság a pépjellegű keverékektől eltekintve, tehát a telítetlen–telített–túltelített betonok tartományában a módosított víz-cement tényezővel szoros korrelációban van. Az x' módosított víz-cement tényező:

$$x' = x \times \frac{V_{ao,s}}{V_a} \qquad \text{(XXVIII)}$$

ahol $V_{ao,s}$ a (XV) és (XVII) átalakításával:

$$V_{ao,s} == V_{ao,40} - 45 \times \exp(-0,1 \times k_s) \quad liter/m^3 \qquad \text{(XXIX)}$$

A módosított víz-cement tényező magába foglalja

- x hatását (a cementpép hígítását),
- a péphiány és a péptartalom viszonyának a hatását (minthogy $V_{ao,s} = 1000 - V_{po,s}$ és $V'_a = 1000 - V'_p$),
- a konzisztencia hatását [minthogy $V_{po} = f(m, U)$],

tehát az m-U-$\Delta V'_p$-x-k_s-R_o kölcsönhatás-rendszer valamennyi elemét.

9.09. A beton nyomószilárdságának a becslése

Vizsgálataim bizonyították, hogy a nyomószilárdság a módosított víz-cement tényezővel bármely konzisztenciájú és bármilyen összetételű betonkeverék esetében szoros korrelációban van, és ezért jó közelítéssel becsülhető az alábbi, átlagos minőségű cementekkel készített betonokra érvényes képletekből:

350-es cement : $R'_o = 960 \times \exp(-4,4 \times \sqrt{x'})$ MPa (XXX)

450-es cement : $R'_o = 800 \times \exp(-3,9 \times \sqrt{x'})$ MPa (XXXI)

A mintegy 10 éven át végzett vizsgálataim bizonyították, hogy a 350-es cementekkel készített betonok nyomószilárdságának szélső értékei az alábbi képletekből számíthatók:

alsó határ : $R'_o = 1040 \times \exp(-4,6 \times \sqrt{x'})$ MPa (XXXII)

felső határ : $R'_o = 810 \times \exp(-4,0 \times \sqrt{x'})$ MPa (XXXIII)

A mintegy 10 éven át végzett vizsgálataim bizonyították továbbá, hogy a 450-es cementekkel készített betonok nyomószilárdságának szélső értékei az alábbi képletekből számíthatók:

alsó határ : $R'_o = 810 \times \exp(-4,0 \times \sqrt{x'})$ MPa (XXXIV)

felső határ : $R'_o = 700 \times \exp(-3,6 \times \sqrt{x'})$ MPa (XXXV)

Ha a beton túltelített, akkor a tömör $(V_l = 0)$ betonra fennáll, hogy $R_o = R'_o$. Ha a beton telítetlen, de kifogástalanul van tömörítve, akkor R_o nyomószilárdsága a (XXIV) képletből számítható. Megjegyzem, hogy telítetlen betonban $x' = x$, mert $V_{ao,s} = V'_a$.

Ha a beton tömörítése nem kielégítő, és ezért $V_{lb} > 0$ légtartalmú, akkor várható nyomószilárdsága a (XXIII) képletből számítható.

9.10. A beton összetételének a tervezése

A beton összetételének a tervezése négy szakaszból áll:

1. az alapanyag-jellemzők meghatározása vizsgálat és számítás útján,
2. a betonkeverék konzisztenciájának a felvétele, az adott konzisztenciájú keverék alapjellemzőinek a számítása,
3. a beton összetételének a számítása. És végül
4. a meghatározott összetételű betonok nyomószilárdságának a becslése.

Az alapanyag-jellemzők közül a betonösszetétel tervezéséhez ismerni kell az adalékanyag finomsági modulusát és egyenlőtlenségi együtthatóját – ezeket a szemeloszlás részletes vizsgálatának vagy

megtervezésének az eredményeiből lehet kiszámítani –, továbbá a cement kötőerejét és fajlagos felületét, ezeket vagy vizsgálni kell az MSZ 523 szerint, vagy becsülni lehet a cement szilárdsági jele alapján.

Az *m* és *U* segítségével lehet kiszámítani az adalékanyagnak a szükséges konzisztenciához tartozó pépigényét és vízigényét, az *S* segítségével lehet meghatározni a cement vízigényét és ebből a tiszta cementpép összetételét (cement- és víztartalmát). A számítás menetét az 1. tervezési séma foglalja össze.

<table>
<tr><th>Adalékanyag-jellemzők</th><th>Cement-jellemzők</th></tr>
<tr><td>Vizsgálat: részletes szemeloszlás</td><td>Vizsgálat: S m^2/kg MSZ 523</td></tr>
<tr><td rowspan="2">Számítás:
Finomsági modulus: $m = \frac{\sum a_i}{100}$
Egyenlőtlenségi együttható: $U = d_{70} / d_{10}$
$d_{70} = 10^{y_1}\ y_1 = \frac{\lg d_1 - \lg d_2}{a_1 - a_2}.(70 - a_2) + \lg d_2$
$d_{10} = 10^{y_2}\ y_2 = \frac{\lg d_3 - \lg d_4}{a_3 - a_4}.(10 - a_4) + \lg d_1$
Pépigény: V_{po} liter/m^3
ha $k_s \geq 40$, akkor $V_{po,40} =$
$= \left(340 + 50\lg\frac{m}{4}\right) - 38.e^{-\frac{2}{U-0,5}}.\left(m - 1,54.e^{\frac{1}{U-0,5}}\right)$
ha $k_s < 40$, akkor $V_{po,s} = V_{po,40} + 45.e^{-0,.k_s}$
Vízigény f ≤ 3 térfogat % mellett:
$w_a = A\ .\ e^{-B.m}$ tömegrész
$A = 0,3.e^{-0,22.(0,1.k_s)^{0,35}}$ $B = 0,17.e^{0,13.(0,1.k_s)^{0,32}}$
Vízigény f > 3 térfogat % mellett:
$w_{af} = w_a + C\ .\ (f-3)$ tömegrész
FN: C=0,001; KK: C=0,0015; K: C=0,002; F: C=0,0025</td><td>Számítás:
Vízigény: w_c tömegrész
$w_c = [0,3 + 0,00028.(S - 100)]e^{-0,35.(0,1.k_s)^{0,}}$
Adott konzisztenciájú pép cementtartalma:
$m_{cp} = \frac{1000}{\frac{1}{3,1} + w_c}$ kg/m^3
Adott konzisztenciájú pép víztartalma:
$m_{wp} = w_c\ .\ m_{cp}$ kg/m^3</td></tr>
<tr><td>Közelítés:
350-es cement: S = 300 m^2/kg
450-es cement: S = 340 m^2/kg
550-es cement: S = 480 m^2/kg</td></tr>
</table>

1. tervezési séma

A betonkeverék konzisztenciáját – felhasználásának helyétől és módjától függően – fel kell venni. A konzisztencia függ a készítési feltételektől (a vasalás sűrűsége, a szerkezet geometriája, a szállítás és a tömörítés módja), ill. a különleges követelményektől (pl. kopásálló beton legfeljebb *KK* konzisztenciájú lehet). A konzisztenciát a szabványos eszközökkel lehet megvizsgálni, a 2. tervezési séma a víztartó képesség *(k_s)* és a tömörödési tényező *(k_{CF})* mérőszámait adja meg.

A beton összetételének a számításához szükséges adatokat a 3. tervezési séma foglalja össze. A számítás két módja lehetséges:

- vagy a cementtartalmat kell megszabni (pl. vasbeton szerkezetekhez elő van írva a megengedett legkisebb cementtartalom) és a vízadagolást, ill. az adalékanyag tartalmat kell meghatározni,
- vagy a víz-cement tényezőt kell megszabni (pl. igen kopásálló betonra $x \leq 0,43$) és meg kell határozni a cement-, víz- valamint adalékanyag-tartalmat.

Szabadon választott: *konzisztencia (k_s és k_{CF} mérőszámmal jellemezve)*

	AFN	FN	KK	K	F	Ö
k_s:	> 30	20-30	6-15	1-4	0,1-0,8	0
k_{CF}:	< 0,1	0,7-0,75	0,76-0,85	0,86-0,92	0,93-0,96	> 0,96

Számítás

Adalékanyag legnagyobb tömege: $m_{ao} = (1000 - V_{po,s}) \times 2,64$ kg/m^3

Alapvíztartalom: $m_{wo} = w_a \times m_{ao}$ vagy $w_{af} \times m_{ao}$ kg/m^3

Mértékadó cementtartalom: $m_{c2} = \dfrac{m_{wo}}{w_c}$ kg/m^3

Alap-cementtartalom: $m_{c1} = \dfrac{m_{c2}}{3}$ kg/m^3

A vízadagolás számítási állandói: $\Delta m_c = m_{cp} - m_{c1}$ és $\Delta m_w = m_{wp} - m_{wo}$

2. tervezési séma

Szabadon választott:

m_c kg/m^3 vagy x víz-cement tényező

Számítás

Szükséges vízadagolás: m'_w

$m'_c \le m_{c1}$: $m'_w = m_{wo}$

$m_{c1} < m'_c < m_{c2}$:

$$m'_w = m_{wo} + \frac{\frac{\Delta m_w}{\Delta m_c}\left(m'_c - m_{c1}\right)}{2}$$

$m'_c > m_{c2}$:

$$m'_w = m_{wo} + \frac{\frac{\Delta m_w}{\Delta m_c}\left(m'_c - m_{c1}\right) + \left(m'_c . w_c - m_{wo}\right)}{2}$$

Számítás

Szükséges cementtartalom: m'_c kg/m^3

$m'_c \le m_{c1}$: $m'_c = m_{wo} / x$

$m_{c1} < m'_c < m_{c2}$:

$$m'_c = \frac{m_{wo} - \frac{\Delta m_w}{2\Delta m_c} \times m_{c1}}{x - \frac{\Delta m_w}{2\Delta m_c}}$$

$m'_c > m_{c2}$:

$$m'_c = \frac{m_{wo} - \frac{\Delta m_w}{\Delta m_c} \times m_{c1}}{2x - \left(w_c + \frac{\Delta m_w}{\Delta m_c}\right)}$$

továbbá mindkét esetre:

$V'_p = \dfrac{m'_c}{3,1} + m'_w = V'_c + V'_w$ liter/m^3 $\Delta V'_p = V'_p - V_{po}$ liter/m^3 $V'_p \le V_{po}$: $m'_o = m_{ao}$ kg/m^3

$V'_a = 2,64 \times m'_a$ liter/m^3 $V_{ao} = 1000 - V_{po}$ liter/m^3 $V'_p \ge V_{po}$: $m'_a = 2,64 \times (1000 - V'_p)$ kg/m^3

3. tervezési séma

A számításokhoz szükséges segédtényezők az 1. és 2. tervezési sémákban megtalálhatók.

A várható nyomószilárdság becslésére a 4. tervezési séma ad tájékoztatást.

Közelítő számítás:

A tömör beton ($V_l = 0$) nyomószilárdsága : $R'_o = A \times e^{-B \times \sqrt{x'}}$, ahol $x' = x \dfrac{v_{ao}}{V'_a}$ és $\Delta V'_p \leq 200$ *liter/m³* mellett:

	350-es cementekre			450-es cementekre		
	alsó határ	átlag	felső határ	alsó határ	átlag	felső határ
A =	1040	960	810	810	800	700
B =	4,6	4,4	4	4	3,9	3,6

Ha $V_l > 0$,akkor $R = R'_o \times e^{-0,035(0,1.V_l)^{1,3}}$ *MPa*. Ha a telítetlen beton jól van tömörítve ($V_{lb} = 0$), akkor $R_o = R'_o \times e^{-0,0035.\left[0,1\times(V_{po}-V'_{po})^{1,3}\right]}$ *MPa*

Vizsgálat:

Két betonkeveréket kell készíteni az adott adalékanyaggal és cementtel, a szükséges konzisztenciával, a nyomószilárdság 28 napos vizsgálatára. A bedolgozott beton γ_b (kg/m³) testsűrűségét szabatosan meg kell határozni.

- 1. keverék: $m'_c \sim m_{c2}$. Ha a cement:víz:adalékanyag tömegaránya *c:w:a* , akkor $n = c+w+a$ (a *c:a* célszerűen *1:3* lehet), és $m_c = (\gamma_b / n).c$, $m_w = (\gamma_b / n).w$, $m_a = (\gamma_b / n).a$ *kg/m³*. A levegőtartalom: $V_l = 1000 - \{(m_c / 3,1) + m_w + (m_a / 2,64)\} = 1000 - (V_c + V_w + V_a)$, *liter /m³*. Ha a mért nyomószilárdság $V_l > 0$ mellett R_1 *MPa*, akkor a tömör ($V_l = 0$) beton R_{o1} nyomószilárdsága: $R_{o1} = R_1 \times e^{0,035.(0,1.V_l)^{1,3}}$ *MPa*. A víz-cement tényező: $x_1 = m_w / m_c$, a módosított víz-cement tényező: $x' = x . (V_{ao} / V'_a)$. Megjegyzendő, hogy a cementtartalom a 2. tervezési séma, a szükséges vízadagolás és adalékanyag tartalom a 3. tervezési séma szerint is számítható.
- 2.keverék: célszerűen $V'_p = V_{po}$. Az adalékanyag adott konzisztenciához tartozó $V_{po,\,ks}$ pépigényét az 1. tervezési séma szerint kell kiszámítani. A beton cementtartalma (m_{co} *kg/m³*):

  ha $m_{co} \leq m_{v1}$, akkor $$m_{co} = (V_{po} - m_{wo}) \times 3,1 \text{ kg/m}^3$$

  ha $m_{co} > m_{c1}$, akkor $$m_{co} = \frac{V_{po} + m_{c1}\dfrac{\Delta m_w}{2\Delta m_c} - m_{wo}}{\dfrac{1}{3,1} + \dfrac{\Delta m_w}{2\Delta m_c}} \text{ kg/m}^3$$

  Vizsgálandó: V_l (mint az első keverék esetében), továbbá R_2 nyomószilárdság. Ha $V_l > 0$, akkor ki kell számítani a tömör beton $R_{02} = R'_{02} = R_2 \times e^{0,035.(0,1.V_l)^{1,3}}$ *MPa* nyomószilárdságát.

  Mivel $V'_p = V_{po}$, ezért $x' = x$. Az $R'_o = A \times e^{-B.\sqrt{x'}}$ függvény állandói:

  $$A = \frac{\sqrt{x'_2} \times \ln R'_{01} - \sqrt{x'_1} \times \ln R'_{02}}{\sqrt{x'_2} - \sqrt{x'_1}} \quad \text{és} \quad B = \frac{\ln \dfrac{R'_{01}}{A}}{\sqrt{x'_1}} = \frac{\ln \dfrac{R'_{02}}{A}}{\sqrt{x'_2}}$$

4. tervezési séma

A becslés lényeges adata a betömörített friss beton testsűrűsége alapján számított V_l levegőtartalom, amely csak próbatestek készítésével ellenőrizhető szabatosan, a testek térfogatának szabatos meghatározásával. A közelítő számítás során a keverék várhat bedolgozhatóságából kell kiindulni, és általában célszerű – a biztonság érdekében – $V_{lb} = 20$ *liter/m³* levegőtartalmat felvenni. Ha $V'_p < V_{po}$ akkor természetesen $V_l = \Delta V'_p$ további levegőtartalom minden esetben figyelembe veendő.

9.11. A betonösszetétel illesztése az MSZ 4720 szerint szilárdsági jelre

A vizsgálataim alapján kidolgozott számítási módszerekkel igazoltam, hogy a beton nyomószilárdsága akkor ingadozik ± 2 MPa értékkel, ha

- cementtartalom eltérése legfeljebb ± 15 kg/m^3,
- a felhasznált, adott szilárdsági jelű cement tényleges kötőereje a gyakorlati határok között változik,
- az adalékanyag finomsági modulusának eltérése legfeljebb ± 0,35 ,
- az adalékanyag agyag-iszap tartalmának eltérése legfeljebb ± 2 térfogat %,
- a betonkeverék konzisztenciája az előírt konzisztencia-határokon belül változik,
- a friss, bedolgozott beton levegőtartalmának ingadozása legfeljebb ± 15 liter/m^3,

Ezekből az adatokból és a betonkészítés technológiájának az adottságaiból következik, hogy a nyomószilárdság változására legnagyobb hatása az adalékanyag minőségingadozásának van (*m, U* és *f* eltérései). Ha tehát adott $R_{k,nom}$ szilárdsági jelű beton összetételét az adalékanyag várható legkedvezőtlenebb szélső értékeiből, valamint az előírt konzisztencia-tartomány lágyabb határértékeiből kiindulva, V_{lb} = *20 liter/m*^{3} felvételével illesztjük a minősítési szilárdsághoz, akkor – a durva hibáktól eltekintve – a keverékből készített beton legkisebb szilárdsága a minősítési szilárdsággal lesz egyenlő.

Ez a módszer a szórás figyelembe vételénél nagyobb biztonságot ad és a beton készítése is gazdaságosabb.

9.12. A betonstruktűra tervezése

Bizonyítottam, hogy az $m - U - \Delta V'_p - x - k_s - R_o$ kölcsönhatása a beton makrostruktúráját meghatározó valamennyi lényeges jellemzőt tartalmazza. A struktúra tervezése a péptelítettség-fogalomból kiindulva azt jelenti, hogy

- a betonkeverék péptartalmát a készítendő beton szükséges konzisztenciájához és az előírt szilárdságához kell illeszteni,
- meg kell tervezni az adalékanyag geometriai jellemzőit annak érdekében, hogy a betont kis mennyiségű vízzel lehessen elkészíteni (ehhez minél nagyobb finomsági modulus szükséges) és pépigénye ne térjen el nagy mértékben a szükséges péptartalom becsült értékétől (kis cementtartalomhoz kisebb, nagy cementtartalomhoz nagyobb pépigényű adalékanyag kedvezőbb),
- ellenőrizni kell, hogy a tervezett szemeloszlású adalékanyaggal megfelelő bedolgozhatóságot, kielégítő víztartó képességet, vérzés- és szétosztályozódás-mentességet lehet-e elérni,
- ha a tervezett szemeloszlás a technológiai feltételekhez nem illeszkedik, akkor úgy kell az adalékanyagot módosítani, hogy a vízigény lehetőleg ne változzék, a pépigény pedig ne térjen el nagy mértékben a becsült péptartalomtól (ha a finomsági modulus változatlan, akkor *U* csökkentésével nő, növelésével csökken a pépigény, de a vízigény nem változik).

KÖSZÖNETNYILVÁNÍTÁS

Értekezésem nagyszámú vizsgálatra, kiterjedt kísérletekre támaszkodik. Amelynek legnagyobb részét az elmúlt 10 évben végeztem el. A kutatáshoz szükséges költségeket a volt Építésügyi és Városfejlesztési Minisztérium Fejlesztési Főosztályának a megbízásai fedezték. Köszönetemet és hálámat kell kifejeznem elsősorban néhai Osterman Alajos osztályvezető helyettes úrnak, akinek támogatása nélkül ezek a megbízások nem jöttek volna létre, és utódjának, Magyar János osztályvezető úrnak, aki az elmúlt években nyújtott segítséget kutatásaim befejezéséhez.

Köszönettel tartozom továbbá az Építéstudományi Intézet Betontechnológiai laboratóriuma valamennyi, a kísérleti munkában résztvevő dolgozójának, akiknek lelkiismeretes munkája nélkül a kutatási eredmények nem lettek volna értékelhetők.

Nem mulaszthatom el megköszönni Palotás László, a műszaki tudományok doktora, ny. egyetemi tanár úrnak, hogy publikációival és személyes példaadásával rávezetett a laboratóriumi kutatás problémáira és a tudományos gondolkodásra.

FELHASZNÁLT IRODALOM

[1] *Balázs, Gy. (1982):* A betonstruktúra elemzése. Doktori disszertációű. MTA. Bp-
[2] *Griffith, A.A. (1920):* Phil. Trans. Roya Soc. A 221. London pp 163-198
[3] *Kaplan, F.M. (1961):* ACI Journal. Detroit. 58. pp 591-610
[4] *Glucklich, J. (1962):* ACI Journal. Detroit. 59. pp 923-929
[5] Fracture Mechanism of Concrete. Szerk.: *Wittmann, F,H. (1983)* Elsevier, Amsterdam, 38 tanulmány
[6] *Ziegeldorf, S. (1983):* cit. [5] pp 31-42
[7] *Berger, R.L. – Lawrence, F.V. – Young, J.F. (1973):* Cem. Concr. Res. London, 3. pp 497-508
[8] *Shah, S.P. – Chandra,, J. (1970):* ACI Journal, Detroit. 67. pp 816-825
[9] *Domone, P.L (1974):* Magazine of Concr. Res. London, 26. pp 144-152
[10] *Mindess, S. (1983):* cit. [5] pp 1-30
[11] *Feret, R. (1892):* Sur la compacité des mortiers hydrauliques. Dunod, Paris
[12] *Bolomey, J. (1930):* Festschrift 1880-0930 der EMPA . Zürich
[13] *Leviant, I. (1966):* Civil Eng. Oct. pp 1255-1260
[14] *Horváth, B.E. (1963):* Nagy hajlító-húzószilárdságú betonok. ÉTI Jelentés, Bp.
[15] *Joisel, A. (1952):* Annales de l'ITBTP 10.
[16] *Abrams, D.A. (1925):* Bull. 1. Struct. Mat. Res. Lab. Chicago
[17] *Dumas, F. (1966):* Travaux, Paris, April. Pp 377-450
[18] *Suenson, J. (1929):* Beton u. Eisen p 399
[19] *Alexanderson, J. (1971):* RILEM Bull. 22.203
[20] *Scholz, W. (1969):* Baustoffkenntnis. Werner Verlag, Düsseldorf
[21] *Rothfuchs, G. (1956):* Betonfibel. Bauverl. GmBH, Wiesbaden
[22] *Palotás, L. (1951):* Minőségi Beton. Műszaki Könyvkiadó, Bp-
[23] *Palotás, L. – Balázs, Gy. (1980):* Mérnöki Szerkezetek Anyagtana III. Akadémiai Kiadó, Bp.
[24] *Popovics, S. (1982)* Fundamentals of Portland Cement Concrete. Vol..1. Fresh Concrete. John Wiley & Sons. New York pp 120-125
[25] *Kausay, T. (1977):* Betonadalékanyagok szemszerkezeti tulajdonságai és a szemszerkezet komplex jellemzésmódja Kandidátusi Dissertáció, MTA, Bp.
[26] *Armuth, A. (1969):* Kis cementadagolású betonok. ÉTI Kutatási Jelentés, Bp-.
[27] *Szizov, V.P. (1979):* Projektirovanie szosztavov tjacselovo betona. Sztrojizdat, Moszkva
[28] *Bazsenov, J.M. (1978):* Technologija betona. Vuzsaja Skola, Moszkva
[29] *Dewar, J.D. (1964):* CCA Techn. Report TRA/375, London
[30] *Erdélyi, A. – Pál. K. (1970):* Betontechnológiai kísérletek az OVH számára. BME Építőanyagok Tanszék,Bp.
[31] *Ujhelyi, J. (1973):* Új cementek betontechnológiai vizsgálata. ÉTI Kutatási Jelentés. Bp.
[32] *Szegő, J. (1988):* A cement szemeloszlási jellemzőinek a hatása. ÉTI Kutatási Jelentés, Bp.
[33] *Ujhelyi, J. (1981):* A cementpép és a levegőtartalom hatása. ÉTI Kutatási Jelentés, Bp.
[34] *Ujhelyi, J. (1974):* Pernyeportlandcementek betontechnológiai vizsgálata. ÉTI Kutatási Jelentés, Bp
[35] *Ujhelyi, J. (1976):* S-100 350 pc betontechnológiai vizsgálata. ÉTI Kutatási Jelentés, Bp.
[36] *Ujhelyi, J. (1983):* Az adalékanyag pépigénye. ÉTI Kutatási Jelentés. Bp.
[37] *Ujhelyi, J. (1988):* A beton szövetszerkezetének optimalizálása. ÉTI Kutatási Jelentés, Bp.
[38] *Ujhelyi, J. (1988):* Építőanyag 2. Bp. pp 54-62
[39] *Ujhelyi, J. (1974):* Magyar Építőipar, 12. Bp.
[40] *Fuller, R. – Thompson, S. (1907):* Eng. News Record, No..3. Lomdon, p 599
[41] *Joisel, A. (1952):* Annales de l'ITBTP, Paris, No.10.
[42] *Caquot, A. – Faury, J. (1937):* Annales de l'ITBTP, Paris No. 9-10.
[43] *Faury, J. (1958):* Le Béton. 3.éd. Dunod, Paris
[44] *Valette, R. (1963):* Manuel de composition des bétons. Eyrolles, Paris
[45] *Lézy, R. – Copferman, I. – Lesage, R. (1961):* Revue de Matériaux, No. 548, Paris
[46] *Palotás, L. – Balázs, Gy. (1980):* cit [23], pp 56-66
[47] *Rothfuchs, G. (1956):* Betonfibel. Bauverlag GmBJ, Wiesbaden
[48] *Weiss, Gy. (1965):* Az adalékanyagok szemnagyságának a hatása. ÉTI Tanulmáy, Bp.
[49] *Alexanderson, J. (1971):* Test. & Res. Mat. & Struct. RILEM, Vol. 4., No. 22
[50] *Leviant, I. (1966):* Civil Eng. Oct. London
[51] *Neville, A.M. (1981):* Properties of Concrete. 3.d. Pitman, New-York, p 700
[52] *Zollinger, R. (1968):* Der Tiefbau, Strassenbau. No.1.
[53] *Palotás, L. – Balázs, Gy. (1980):* cit. [23], pp 72-89

[54] *Kézdi, Á. (1967):* Handbuch der Bodenmechanik. Akadémiai Kiadó – VEB Verlag für Bauwesen, Bp. – Berlin.
[55] *Karnaukov, A.P. (1973):* Proc. of Int. Symp. Tone 1. Prague. Pp A3-A33
[56] *Furnas, C.C. (1931):* Eng. Chem.. Vol. 23. No. 9. pp 1052-1058
[57] *Ujhelyi, J. (1976):* Az ÉSZKMI 19-77 Irányelv elvi alapjai. ÉTI Tanulmány, Bp.
[58] *Ujhelyi, J. (1977):* Magyar Építőipar. 9. Bp.
[59] *Ujhelyi J. (1979):* Receptbetonok összetételének a meghatározása. ÉTI Kutatási Jelentés, Bp.
[60] *Ujhelyi, J. (1979):* Forgalomban lévő cementek betontechnológiai vizsgálata. ÉTI Kutatási Jelentés, Bp.
[61] *Palotás, L. – Balázs, Gy. (1980):* cit.. [23] p 315
[62] *Kézdi, Á. (1957):* Talajmechanika. Mérnöki Kézikönyv 2. Szerk: *Palotás, L.* Műszaki Könyvkiadó, Bp. pp 47-48
[63] *Ujhelyi, J. (1988):* Építőanyag, 3. Bp. pp81-90
[64] *Powers, T.C. – Brownyard, T.L. (1947):* ACI Journal, Detroit. No. 1-2
[65] *Powers, T.C. (1958):* Portl. Cem. Ass. Res. Dept. Bull. 90. July, Chicago
[66] *Copeland, L.E.. – Huges, J.C. (1953):* ASTM Bull. Dec. No. 194.pp 70-74
[67] *Bolomey, J. (1934):* Schweizerische Bauztg. 162.. Bd.68.
[68] *Balsin, M.Y.: (1969):* Dokl. Akad. Nauk. Moszkva, Vol.67, No. 3.
[69] *Ryshkewitz, E. (1953):* Journal Am. Cer. Soc. 36.
[70] *Schiller, K.K. (1971):* Cem. And Concr. Res. London, No.1.
[71] *Bailey, J.E. – Hill, N.A. (1970):* Proc. of British Cer. Soc.. Lpndon No. 15.
[72] *Lydon, F.D. (1982):* Concrete Mix Design. Appl. Sc. Publ. London – New York
[73] *Taplin, J.H. (1959):* Australian J. Appl. Sc. Melbourne, No.10.
[74] *Taplin, J.H. (1962):* Australian J. Appl. Sc. Melbourne, No.13.
[75] *Berger, R.L. – Lawrence, F.W. – Young, J.F. (1973):* Cem. and Concr. Res. London, No. 3.
[76] *Erntroy, H.C. – Shacklock, B.V. (1954):* Design of High Strength Concrete Mixtures. Proc. Symp. of Mix Design, London
[77] *Newman, A.J. – Teychenné, D.C. (1954):* Cement, Lime and Gravel. London, Vol. 28. No.12.
[78] *Popovics, S. (1986):* ACI Journal, Detroit, Jan.-Febr.
[79] *Ujhelyi, J. (1981):* MI-04.19_81 Beton és vasbeton készítése. ÉTK, Bp.
[80] *Ujhelyi, J. – Buday, T. (1985):* TS-1. Tervezési segédlet a különleges követelményeket kielégítő beton és vasbeton szerkezetekhez.. ÉTI – ÉTK, Bp.
[81] *Himsworth, F.R. (1954):* The application of statistics to concrete quality. Proc. Symp. on Mix Design. London
[82] *Cordon, H. (1956):* ACI Journal, Detroit No..6.
[83] *Rüsch, H. (1964):* Materialprüfung. Berlin. No. 11.
[84] *Ujhelyi, J. (1978):* A beton szilárdsági szórásának és a szilárdság valószínűségi eloszlásának a vizsgálata. ÉTI Kutatási Jelentés, Bp.
[85] *Palotás, L. – Balázs, Gy. (1980):* cit.. [23], p 163
[86] *Palotás, L. (1986):* Építőanyagok. Akadémiai Kiadó, Bp.
[87] *Thanh, N.H. (1986):* Ferrocement betonjának tervezése. Kandidátusi értekezés, MTA, Bp.
[88] *Zsigovics,I. (1987):* A péptelítettséghez szükséges pépigény meghatározása zúzott adalékanyag esetére. BME Építőanyagok Tanszék, Bp. nov.
[89] *Balázs, Gy. (1981):* cit. [1], pp 12-16
[90] *Balázs, Gy. (1988):* Építőanyag. Bp. 40..4. szám, pp 125-127
[91] *MSZ 18293* Építési kőanyagok, homok, homokos kavics, kavics
[92] *MSZ 4713* A beton alapanyagainak munkahelyi vizsgálata
[93 *Zielinszkx, Sz. (1909):* A román- és a portlandcementek szilárdulása pépben, habarcsban és betonban. Anyagvizsgálók Magyar Egyesülete. Bp.
[94] *Balázs, Gy. (1982):* Ragasztástechnika. Műszaki Könyvkiadó, Bp.

1. táblázat: Cementek vízigényének a vizsgálata

Év	m'_{cp}	m'_{cw}	$w'_p = x_p$	k_s	k_{CF}	k_r	k_t
váci 350 kspc 20 R_c = 50,7 MPa S = 306 m^2/kg							
1987	1898	388	0,204	75	0,56	-	-
	1807	417	0,231	22	0,62	-	-
	1737	440	0,253	10	0,67	-	-
	1585	489	0,308	0,3	0,84	-	-
	1862	400	0,215	50	-	-	-
	1778	426	0,24	15	-	-	-
	1736	440	0,253	5	-	-	-
	1710	449	0,262	4	-	-	-
	1638	472	0,288	1,5	-	-	-
	1595	486	0,305	0,5	-	-	-
	1558	498	0,319	1	-	-	-
váci 350 kspc 20 R_c = 44,4 MPa S = 295 m^2/kg							
1988	1847	404	0,219	36	0,61	0	-
	1690	455	0,269	3,5	0,74	50	38
	1637	472	0,288	2	0,79	90	40
	1509	513	0,34	0,1	0,94	125	51
	1736	440	0,253	11	0,66	35	34
	1808	417	0,231	24	0,63	8	-
	1509	513	0,34	0,05	0,93	130	52
	1690	455	0,269	4	0,72	60	37
	1724	444	0,257	6	0,69	38	34
	1653	467	0,282	2	0,75	63	44
	1828	411	0,22	30	0,61	-	-
	1862	399	0,215	53	0,57	-	-
	1779	426	0,24	16	0,63	-	-
	1862	399	0,221	48	0,59	-	-
	1779	426	0,24	14	0,65	-	-
	1690	455	0,269	3	0,75	-	-
	1690	455	0,269	4	0,76	-	-
	1595	485	0,304	0,8	0,81	-	-
váci 350 kspc 20 R_c = 42,3 MPa S = 302 m^2/kg							
1988	1595	485	0,304	0,4	0,85	95	45
	1696	453	0,269	0,45	0,74	55	39
váci 450 pc R_c = 51,7 MPa S = 321 m^2/kg							
1987	1826	411	0,225	37	0,58	0	-
	1790	422	0,236	25	0,61	5	-
	17153	435	0,248	13	0,65	22	-
	1731	441	0,255	10	0,68	29	31
	1690	455	0,269	6	0,69	48	33
	1662	464	0,279	3	0,73	54	40
	1638	472	0,288	2	0,77	70	42
	1605	482	0,3	1	0,83	95	45
	1482	522	0,352	0,1	0,96	128	53
kísérleti cement S = 152 m^2/kg							
1988	1806	417	0,231	5	-	-	-
	1688	456	0,27	0,4	-	-	-
kísérleti cement S = 329 m^2/kg							
1988	1806	417	0,231	32	-	-	-
	1688	456	0,27	7	-	-	-
kísérleti cement S = 355 m^2/kg							
1988	1806	417	0,231	39	-	-	-
	1662	464	0,279	4,5	-	-	-

2. táblázat: Betonkeverékek vízigényének vizsgálata (1988-89 év, váci 350 kspc 20 cement, R_c =44,4 MPa, S = 295 m^2/kg, D = 16 m. m = 6,55 , U = 21,4)

m'_c	m'_w	m_a'	w'_a	x	m_{wo}	m'_w-m_{wo}	k_s	k_{CF}
0	123	2158	0,0569	-	123	0	30	-
100	123	2158		1,277		0	28	0,59
123	123	2158		1,000		0	30	0,722
155	123	2158		0,800		0,3	30	0,748
189	123	2154		0,650		0,2	30	0,746
251	129	2116		0,514		6,3	30	0.753
350	137	1980		0,391		14,2	30	0,678
500	50	1818		0.300		26,2	30	0,623
755	196	1480		0,260		73,2	30	0,616
1130	271	962		0,240		148,4	30	0,609
1828	411	0		0,225		287,7	30	0,611
0	164	2067	0,0794	-	164	0	2	-
117	164	2067		1,4		0	2	0,810
164	164	2067		1		0	2	0,823
182	164	2051		0,9		0	2	0,818
207	166	2027		0,8		1,3	2	0,841
242	169	1988		0,7		4,9	2	0,845
290	174	1933		0,6		9,9	2	0,837
360	182	1854		0,5		17,5	2	0,853
486	194	1713		0,4		30,1	2	0,86
587	205	1599		0,35		41,2	2	0,827
1113	334	811		0,3		169,6	2	0,803
1645	469	0		0,285		305,1	2	0,748

3. táblázat: Szokványos módon utókezelt cementpép-testek vizsgálatának eedményei (+ 22–25 °C, 7 nap vízben, utána szobalevegőn)

m'_c	m'_w	x_p	R	$V_l = V_{lb}$	k_s	$R_o = R'_o$
váci 350 kspc 20 R_c = 44,4 MPa S = 295 m^2/kg						
1860	400	0,215	74	55	40	102
1840	407	0,221	79	48	30	104
1778	427	0,24	86	32	16	101
váci 450 pc R_c = 51,7 MPa S = 321 m^2/kg						
1846	404	0,219	78	61	42	112
1762	432	0,245	91	42	16	115

4. táblázat: Cementpép testek vizsgálatának eredményei ($x > 0,26$ mellett szokványos utókezelés, $x \leq 0,26$ mellett tárolás +5 °C hőmérsékleten az első 24 órában, utána 14 napig +15 °C vízben, majd szobalevegőn)

m'_c	m'_w	x_p	R	$V_l = V_{lb}$	k_s	$R_o = R'_o$
váci 350 kspc 20 $R_c = 44,4$ *MPa* $S = 295\ m^2/kg$						
1862	399	0,215	64	87	42	115
1860	400	0,215	60	56	40	125
1840	407	0,231	89	46	30	114
1826	411	0,225	97	24	20	108
1779	426	0,24	84	37	10	102
1779	426	0,24	89	35	12	106
1779	426	0,24	91	21	10	100
1778	427	0,24	93	26	16	105
1696	453	0,267	83	14	4	88
1690	455	0,269	85	23	2,5	94
1690	455	0,269	79	22	1,5	87
1672	447	0,267	84	18	2	90
1655	456	0,282	80	6	2	81
1595	485	0,304	67	15	1,2	71
1595	485	0,304	66	10	0,4	69
1568	494	0,315	72	0	0,4	72
1509	513	0,34	55	0	0,5	55
1509	513	0,34	59	0	0,3	59
1498	517	0,345	57	0	0	57
1483	522	0,352	52	0	0	52
váci 450 pc $R_c = 51,7$ $S = 321\ m^2/kg$						
1846	404	0,219	91	64	4,2	135
1762	432	0,245	97	42	16	121
1711	448	0,262	91	37	8	110
1638	472	0,288	89	19	2	97
1593	486	0,305	79	15	0,5	84
1559	497	0,319	76	0	0,3	76
1505	515	0,342	63	0	0,1	63

5. táblázat: Részletes betonvizsgálatok eredményei (350 kspc 20 váci cement, R_c = 42,3 MPa, S = 295 m^2/kg)

m'_c	m'_w	m'_a	x	k_s	V_{po}	V'_p	$\Delta V'_p$	V_{lb}	V_l	R	R_0	R'_o
D = 16 mm m = 6,55 U = 21,4 FN konzisztencia												
100	123	2154	1,277	25	184	160	-25	5	29	6	6	7
123	123	2158	1	30	183	163	-20	14	34	8	9	10
155	123	2158	0,6	30	183	173	-10	19	29	14	16	17
189	123	2154	0,65	30	183	184	-2	33	=	20	24	=
251	124	2121	0,492	32	180	205	+24	20	=	35	39	=
300	132	2037	0,438	31	182	228	+46	14	=	47	50	=
400	140	1930	0,35	32	182	269	+87	14	=	62	65	=
500	149	1822	0,297	36	182	310	+128	25	=	69	77	=
572	155	1745	0,27	36	182	339	+158	27	=	77	87	=
630	169	1540	0,26	36	182	379	+197	30	=	82	95	=
800	198	1437	0,247	37	182	456	+274	47	=	75	97	=
1000	235	1167	0,235	42	181	558	+377	58	=	72	101	=
1300	331	490	0,221	42	180	814	+634	61	=	81	116	=
1862	399	0	0,215	42	180	1000	+820	87	=	64	115	=
D = 16 mm m = 6,55 U = 21,4 KK konzisztencia												
100	144	2120	1,438	10	197	176	-21	20	41	3	3	4
144	144	2119	1	10	197	190	-7	5	12	9	9	9
169	144	2116	0,85	10	197	198	+1	0	=	13	=	=
192	144	2097	0,75	10	197	206	+9	1	=	16	=	=
250	149	2033	0,597	10	197	230	+33	0	=	24	=	=
300	152	0982	0,508	10	197	249	+52	0	=	36	=	=
405	162	1867	0,401	11	195	293	+98	0	=	52	=	=
482	169	1783	0,351	11	195	325	+130	16	=	55	59	=
599	179	1657	0,299	15	190	373	+182	17	=	69	74	=
800	222	1374	0,27	15	190	480	+289	21	=	77	84	=
999	263	1092	0,263	15	190	585	+395	25	=	85	95	=
1199	305	812	0,253	15	190	692	+502	38	=	80	98	=
1400	347	532	0,248	16	189	799	+609	26	=	90	102	=
1600	389	252	0,243	16	189	905	+715	35	=	99	103	=
1779	426	0	0,24	16	189	1000	+811	35	=	89	106	=
D = 16 mm m = 6,55 U = 21,4 K konzisztencia												
117	164	2067	1,401	2	217	202	-16	0	16	4	4	5
164	164	2067	1	2	217	217	0	16	=	9	9	9
182	164	2052	0,899	2	217	223	+6	1	=	11	11	=
206	164	2032	0,798	2	217	230	+13	0	=	13	=	=
239	168	1993	0,701	2	217	245	+28	0	=	16	=	=
287	172	1941	0,601	2	217	265	+48	0	=	25	=	=
359	179	1862	0,5	2	217	295	+78	0	=	34	=	=
448	191	1730	0,399	2	217	345	+128	0	=	44	=	=
572	200	1624	0,35	2,8	214	385	+171	0	=	59	=	=
750	236	1377	0,315	3,5	212	478	+266	0	=	67	=	=
1000	295	1011	0,295	3,5	212	617	+405	8	=	74	=	=
1200	341	718	0,284	3,5	212	728	+561	23	=	76	84	=
1690	455	0	0,269	4	211	1000	+790	24	=	85	94	=

5. táblázat 1. folytatása

D = 16 mm			*m = 6,55*			*U = 21,4*		*F konzisztencia*				
133	187	2033	1,4	0,1	225	230	+5	24	=	6	7	=
187	187	1988	1	0,1	225	247	+22	0	=	9	=	=
205	187	1973	0,913	0,1	225	253	+28	0	=	10	=	=
238	190	1936	0,8	0,1	225	267	+42	0	=	13	=	=
277	195	21890	0,702	0,1	225	284	+59	0	=	14	=	=
335	201	1825	0,6	0,1	225	309	+84	0	=	21	=	=
419	210	1729	0,5	0,1	225	345	+120	0	=	33	=	=
563	225	1566	0,4	0,7	222	407	+185	0	=	44	=	=
800	279	1222	0,349	0,5	223	537	+344	0	=	52	=	=
1000	331	915	0,331	0,8	222	653	+432	0	=	63	=	=
1200	383	608	0,319	0,5	223	770	+547	0	=	66	=	=
100	435	300	0,311	1	221	886	+665	0	=	68	=	=
1595	485	0	0,304	1,2	224	1000	+777	2	=	67	71	=
D = 16 mm			*m = 5,596*			*U = 19,9*		*FN konzisztencia*				
121	144	2077	1,2	30	213	183	-31	6	37	7	7	9
144	144	2077	1	30	213	190	-23	20	43	8	9	11
159	144	2077	0,9	30	213	195	-18	29	47	11	13	15
179	144	2077	0,8	30	213	202	-12	31	43	13	15	16
205	144	2077	0,7	30	213	210	-3	35	38	16	19	20
241	145	2051	0,6	30	213	223	+10	46	=	21	27	=
299	149	1991	0,5	30	213	246	+33	41	=	34	42	=
392	157	1892	0,4	33	213	283	+71	37	=	46	55	=
464	162	1816	0,35	33	213	312	+100	34	=	59	70	=
569	171	1705	0,3	35	212	354	+142	28	=	67	77	=
669	178	1599	0,267	38	211	394	+183	0	=	78	90	=
1000	243	1165	0,243	32	213	566	+353	33	=	84	99	=
1200	281	877	0,234	32	213	668	+455	41	=	87	108	=
1400	318	607	0,227	31	213	770	+558	48	=	86	113	=
0599	356	338	0,223	40	211	872	+661	51	=	82	110	=
1862	399	0	0,215	40	211	1000	+789	46	=	92	118	=
D = 16 mm			*m = 5,596*			*U = 19,9*		*KK konzisztencia*				
119	166	2039	1,4	10	228	204	-23	18	41	4	4	5
166	166	2040	1	10	228	220	-8	37	45	7	9	9
208	166	2024	0,8	10	228	233	+6	36	=	12	15	=
285	171	1947	0,6	11	226	263	+37	32	=	22	25	=
464	186	1858	0,4	11	226	335	+109	18	=	52	56	=
679	204	1523	0,3	17	219	423	+204	19	=	71	76	=
1133	295	898	0,26	13	223	660	+437	23	=	80	89	=
1779	426	0	0,24	16	220	1000	+780	35	=	89	106	=

5. táblázat 2. folytatása

D = 16 mm m = 5,596 U = 19,9 K konzisztencia												
135	188	1986	1,4	2	248	231	-17	0	17	4	4	4
188	188	1985	1	2	248	248	0	3	=	8	9	=
235	189	1942	0,8	2	248	264	+17	21	=	13	14	=
328	197	1842	0,6	2	248	303	+55	15	=	24	25	=
540	216	1609	0,4	2	248	390	+143	6	=	50	51	=
658	230	1461	0,35	2	248	443	+195	4	=	57	57	=
983	295	1024	0,3	3,5	243	612	+369	13	=	70	73	=
1655	466	0	0,282	2	248	1000	+752	6	=	80	81	=
D = 16 mm m = 5,596 U = 19,9 F konzisztencia												
152	212	1953	1,396	0,1	256	260	+5	0	=	5	=	=
212	212	1901	1	0,1	256	280	+24	0	=	7	=	=
235	212	1879	0,9	0,1	256	288	+33	0		9	=	=
269	215	1842	0,8	0,2	255	302	+47	3		13	13	=
315	220	1791	0,699	0,2	255	322	+67	2	=	18	18	=
277	226	1722	0,6	0,2	255	348	+93	2	=	25	26	=
472	236	1615	0,501	0,2	255	388	+133	1	=	38	38	=
629	252	1440	0,4	0,3	255	455	+200	4	=	45	46	=
674	256	1390	0,38	0,3	255	474	+219	8	=	51	52	=
769	277	1234	0,36	0,4	254	525	+271	0	=	57	=	=
944	321	987	0,34	0,4	254	626	+372	5	=	58	59	=
1225	392	561	0,32	0,3	255	788	+533	7	=	63	64	=
1595	485	0	0,304	1,2	252	1000	+748	15	=	66	71	=
1509	513	0	0,34	0,3	255	1000	+745	0	=	59	=	=
D = 16 mm m = 4,922 U = 12,1 FN konzisztencia												
111	155	2001	1,4	35	242	191	-51	19	70	4	4	6
156	156	2001	1	35	242	206	-36	29	66	6	7	10
173	156	2001	0,902	35	242	211	-31	32	63	9	11	14
194	156	2001	0,802	35	242	218	-24	37	61	12	14	17
223	156	2001	0,7	35	242	228	-15	39	53	15	19	21
242	156	2001	0,644	35	242	234	-8	46	55	20	26	28
262	158	2000	0,601	35	242	242	0	53	=	22	30	=
324	162	1936	0,501	35	242	267	+25	48	=	27	36	=
424	169	1832	0,399	35	242	306	+64	55	=	45	52	=
501	175	1750	0,35	35	242	337	+95	33	=	53	63	=
615	184	1631	0,299	36	242	382	+140	49	=	63	83	=
672	188	1570	0,28	36	242	405	+163	43	=	70	88	=
727	192	1513	0,265	37	242	427	+185	46	=	71	92	=
1037	249	1099	0,24	40	241	584	+313	44	=	80	101	=
1826	411	0	0,225	30	240	1000	+760	24	=	97	108	=
D = 16 mm m = 4,922 U = 12,1 KK konzisztencia												
128	179	1969	1,404	12	254	221	-34	21	54	4	4	5
179	179	1969	1	12	254	237	-17	44	62	6	8	9
225	179	1969	0,798	12	254	252	-3	49	52	11	15	15
263	184	1931	0,7	10	257	268	+11	30	=	17	20	=
306	184	1894	0,601	12	254	283	+28	32	=	21	24	=
389	195	1795	0,5	10	257	320	+63	19	=	32	35	=
498	199	1690	0,4	12	254	360	+106	46	=	40	52	=
725	218	1448	0,3	13	253	452	+199	36	=	65	68	=
874	244	1250	0,28	15	251	527	+276	25	=	77	86	=
1168	304	844	0,26	15	251	681	+430	36	=	83	100	=
1779	426	0	0,24	16	250	1000	+750	26	=	93	105	=

5. táblázat 3. folytatás

D = 16 mm			*m = 4,922*			*U = 12,1*			*K konzisztencia*			
144	202	1916	1,401	3	274	248	-26	30	56	3	3	4
202	202	1916	1	3	274	267	-7	46	53	6	8	8
227	204	1907	0,899	2	278	278	0	17	=	10	10	=
258	201	1896	0,809	4	271	22	+11	59	=	10	14	=
300	210	1831	0,7	2	278	306	+29	24	=	15	16	7
350	210	1787	0,6	3	274	323	+49	49	=	17	22	=
575	230	1544	0,4	3	274	415	+141	33	=	40	47	7
748	245	1355	0,328	4	271	487	+216	18	=	62	67	=
1369	383	463	0,28	4	271	825	+554	5	=	80	81	=
1696	453	0	0,267	4	271	1000	+729	14	=	83	87	=
D = 16 mm			*m = 4,922*			*U = 12,1*			*F konzisztencia*			
161	225	1889	0,402	0,3	285	277	-7	8	15	4	4	4
225	225	1853	1	0,3	285	298	+14	33	=	7	9	=
251	226	1829	0,902	0,4	284	307	+23	30	=	8	10	=
287	229	1790	0,799	0,3	285	322	+37	22	=	10	11	=
335	234	1738	0,699	0,3	285	342	+57	21	=	15	16	=
401	241	1663	0,6	0,2	285	370	+85	23	=	21	23	=
500	250	1554	0,5	0,2	285	411	+126	14	=	31	33	=
665	266	1371	0,4	0,3	285	481	+196	0	=	44	=	=
742	272	1290	0,369	0,4	284	511	+227	0	=	52	=	=
878	307	1082	0,35	0,4	284	590	+306	0	=	55	=	=
1165	379	649	0,325	0,5	284	754	+471	0	=	63	=	=
1595	485	0	0,304	0,4	284	1000	+716	10	=	66	69	=

6. táblázat: Telített betonkeverékek vizsgálata (váci 350 kspc 20, R_c = 53,9 MPa)

m'_c	m'_w	m'_a	x	V_{po}	$\Delta V'_p$	V_{lb}	V_l	k_s	R	R_o=R'_o
D = 16 mm			*m = 6,482*			*U = 11,5*				
233,9	125,4	2109,8	0,537	200,8	0	52	=	30	32	43,1
220,7	164,5	2017,6	0,745	235,4	0	3,2	=	2	21,3	21,5
220	143,9	2072,6	0,656	215,1	0	8,9	=	10	28,4	29,3
182,2	184,5	1997,5	1,012	243,1	0	0	=	0,5	13,7	=
149,4	198,4	1988,9	0,326	243,6	0	4,6	=	0	9,5	9,6
D = 16 mm			*m = 4,922*			*U = 12,1*				
257,7	156,9	2006,3	0,609	240,2	0	63,7	=	30	23,1	34,1
233,9	179,2	1967,8	0,765	254,6	0	62,5	=	10	16,1	23,5
227,7	201,5	1913,9	0,883	274,8	0	28,4	=	2	13,1	15
177	225,4	1894,2	1,277	282,8	0	13	=	0,5	6,9	7,3
127,8	241,7	1893,2	1,889	283	0	11,3	=	0,1	3,2	3,3
D = 16 mm			*m = 5,596*			*U = 19,9*				
216,1	143,8	2076,2	0,665	213,3	0	43,2	=	30	24,4	30,9
190,8	166,1	2039	0,87	227,7	0	23	=	10	14	15,5
185,4	187,7	1984,2	1,012	247,9	0	4,9	=	2	11,7	11,9
036,2	211,6	1965,6	1,552	255,7	0	0	=	0,5	4,6	4,6
89,2	221,7	1978,7	2,572	250,5	-5,5	0	5,5	0,1	1,5	1,5
D = 16 mm			*m = 6,584*			*U = 37,5*				
153,9	123,1	2184,1	0,802	173	-0,2	26,6	26,8	30	18,8	21,3
133,1	144,6	2145,1	1,089	187,3	+0,2	1,3	=	10	11,9	11,9
131,5	165,3	2091,5	1,256	207,6	+0,1	1,3	=	2	8,5	8,5
85,4	187,7	2071,8	2,198	215,3	0	0	7	0,1	3,2	3,2

7. táblázat: Az 1989 évi ellenőrző vizsgálatok eredményei (váci 350 kspc 20, R_c = 53,9 MPa)

m'_c	m'_w	m'_a	x	$\Delta V'_p$	V_{lb}	V_l	x'	R	R_o	R'_o
D = 32 mm m = 7,434 U = 14 k_s *= 40* V_{po} *= 163,1*										
75,2	98,7	2209,5	1,313	-40,1	8	48,1	1,313	6,7	7,1	8,8
98,7	98,7	2209,5	1	-32,6	12,4	45	1	10,9	11,8	13,9
120	98,7	2209,5	0,823	-25,7	0	25,7	0,823	20,9	=	23,6
149,3	98,7	2209,5	0,661	-16,2	0	16,2	0,661	31,8	=	34
D = 16 mm m = 6,569 U = 8,1 k_s *= 15* V_{po} *= 220,2*										
150	131,3	2058,6	0,875	-40,5	9,2	49,7	0,875	13,4	14,3	17,8
200	133,3	2058,6	0,667	-22,4	0	22,4	0,667	25,6	=	28,3
D = 8 mm m =4,37 U =9,9 k_s *= 50* V_{po} *= 260,3*										
128,7	158,3	1952,8	1,23	-60,6	27,5	88,1	1,23	4	5	7,2
D = 32 mm m = 6,17 U = 44,8 k_s *= 45* V_{po} *= 182,5*										
129,8	122	2158,2	0,941	-18,6	6,6	25,2	0,941	13,5	14,1	15,2
D = 32 mm m = 7,362 U = 21 k_s *= 45* V_{po} *= 155,2*										
138,2	99,4	2230,2	0,719	-11,2	62,3	73,5	0,719	15,8	24,3	25,3
D = 32 mm m = 8,157 U = 1,7 k_s *= 15* V_{po} *= 331,3*										
100	82,3	1765,8	0,823	-216,5	0	216,5	0,823	2,9	=	19,5
140	85,1	1765,8	0,607	-200,8	5,2	206	0,607	5,5	5,8	32,7
210	92,4	1765,8	0,44	-171	12,6	183,5	0,44	12,8	14,7	59,6
350	107	1765,8	0,306	-111,2	30	141,2	0,306	30,4	40,7	90,7
D = 8 mm m = 7,0 U = 1,5 k_s *= 40* V_{po} *= 345,6*										
127,2	82,5	1727,7	0,649	-222,1	0	222,1	0,649	4,8	=	34,6
D = 16 mm m = 8,0 u = 1,5 k_s *= 40* V_{po} *= 335,7*										
129,1	69,3	1753,6	0,537	-224,8	0	224,8	0,537	6,5	=	48,1
D = 32 mm m = 9,0 U = 1,5 k_s *= 40* V_{po} *= 334,6*										
129,4	55,8	1756,6	0,431	-237,1	0	237,1	0,431	7,5	=	64,3
D = 8 mm m = 5,586 U = 5,2 k_s *= 45* V_{po} *= 255,9*										
146,8	124,6	1964,3	0,849	-83,9	79,5	163,4	0,849	5,5	11,8	20,6
D = 8 mm m = 5,676 U = 11,3 k_s *= 45* V_{po} *= 220,5*										
123,8	128,7	2057,8	1,04	-51,8	0	51,8	1,04	10	=	13,5
178,2	128,8	2057,8	0,722	-34,2	0	34,2	0,722	21,8	=	25,9

8. táblázat: Túltelített betonok vizsgálata (1989 év, váci 350 kspc 20, R_c = 53,9 MPa, S = 316 m^2/kg)

m'_c	m'_w	m'_a	x	V'_p	$\Delta V'_p$	V_{lb}	x'	R	R_o
D = 16 mm m = 6,03 U = 3,6 k_s *= 20* V_{po} *= 277,2*									
396,	149,3	1908,2	0,376	272,2	0	0	0,376	65	68,1
437,1	153	1863,8	0,35	294	+16,8	14,2	0,35	66,1	69,9
542,2	162,7	1748,9	0,3	337,6	+60,4	17,1	0,327	77,6	83,2
D = 16 mm m = 6,03 U = 6,1 k_s *= 20* V_{po} *= 243,6*									
303,3	145,8	1996,9	0,481	243.6	0	15,4	0,481	45,2	48,1
382,2	152,9	910,9	0,4	276,2	+32,6	9,5	0,418	61,6	63,6
455,9	159,6	1830,5	0,35	306,6	+63	11,7	0,382	66.1	69
564,7	169,4	1711,8	0,3	351,6	+108	16,8	0,35	69,7	74,7
D = 16 mm m = 6,03 U = 13,9 k_s *= 20* V_{po} *= 211,9*									
214,6	142,7	2080,6	0,665	211,9	0	6,2	0,665	32,2	32,8
241,9	145,1	2050,9	0,6	223,1	+11,2	0	0,609	36,7	=
300,7	150,4	1987	0,5	247,4	+35,5	0	0,524	40,5	=
397,5	159	1881,7	0,4	287,2	+75,3	4,6	0,442	53	53,7
473,4	165,7	1799,5	0,35	318,4	+106,5	7,2	0,405	64.6	66,1
586	175,8	1676,8	0,3	364,8	2152,9	14,4	0,372	68,2	72,1

8. táblázat folytatása

D = 16 mm m = 6,03 U = 21,5 k_s = 20 V_{po} = 202,5									
184,8	142,9	2105,5	0,773	202,5	0	14,5	0,773	21,9	23,2
204,7	143,3	2087,4	0,7	209,3	+6.8	18,4	0,706	25,9	28
244,7	146,8	2044	0,6	225,8	+23,3	15,6	0,618	30,3	32,2
304,2	152,1	1979,3	0,5	250,3	+47,8	12	0,532	39,9	41,7
402	160,8	1873,1	0,4	290,5	+88	12	0,450	55,6	58,1
479	167,6	1789,5	0,35	322,2	+119,7	17,3	0,412	59,1	63,5
592,4	177,7	1666,4	0,3	368,8	+146,3	24,1	0,379	62,9	70,2
D = 16 mm m = 6,03 U = 35,2 k_s = 20 V_{po} = 189,5									
159,3	144,2	2123,7	0,905	195,6	0	36,2	0,905	13,1	15,8
206,6	144,2	2082,4	0,7	211,2	+15,6	24,6	0,714	26,4	29,5
246,9	148,2	2038,6	0,6	227,8	+32,2	27	0,625	30,6	34,8
306,9	153,5	1973,5	0,5	252,5	+56,9	31,8	0,538	39	45,7
405,5	162,2	1866,5	0,4	293	+97,4	22,1	0,455	51,9	57,3
483	169	1782,4	035	324,9	+129,3	35,1	0,417	48,5	58
597,2	179,2	1658,5	0,3	371,8	+176,3	38,9	0,384	53	65

9. táblázat: Példa a betonösszetétel tervezésére (D = 24 mm, m = 6,38, U = 26,3, $V_{pö}$ = 220,8 liter/m^3, 350-es cement, K konzisztencia, k_s = 1,5)

m'_c	m'_w	m'_a	x	V'_p	$\Delta V'_p$	x'	$R'_ő$		
							alsó	*átlag*	*felső*
Számítás a cementtartalom felvételével									
125	172	2057	1,376	212,3	-8,5	1,376	4,7	5,5	7,4
200	172	2015,6	0,86	236,5	+15,7	0,878	14	15,5	19,8
250	177,2	1959,3	0,709	257,8	+37	0,744	19,7	21.6	25,7
300	182,3	1903,2	0,68	279,1	+58,3	00,657	25	27,1	31,7
350	187,5	1846,9	0,536	300,4	+79,6	0,597	29,7	32	36,8
400	192,7	1790,6	0,482	321,7	+100,9	0,554	33,9	36,3	41,3
450	197,8	1734,6	0,44	343	+122,2	0,522	37,5	40	45
500	203	1678,3	0,406	364,3	+143,5	0,498	40,5	43	48,1
550	208,2	1622	0,378	385,6	+164,8	0,479	43	45,7	50,8
600	213,3	1565,9	0,356	406,8	+186	0,468	44,7	47,3	52,3
Számítás a víz-cement tényező felvételével									
143,3	172	2057	1,2	218,2	-2,6	1,2	6,7	7,7	10,1
172	172	2039,4	1	227,5	+6,7	1,009	10,2	11,6	14,6
191,1	172	2023,3	0,9	233,6	+12,8	0,915	12,8	14,3	17,7
217,2	173,8	1996,3	0,8	243,8	+23	0,824	16	17,7	21,5
253,6	177,5	1988,3	0,7	259,3	+38,5	0,736	20,1	22	26,2
304,7	182,8	1897,9	0,6	281,1	+60,3	0,65	25,5	27,6	32,2
381,5	190,8	1811,5	0,5	313,8	+93	0,568	32,5	34,8	39,7
510,1	204	1666,9	0,4	368,6	+147,8	0,494	41	43,6	48,7

10. táblázat: A betonösszetétel tervezése minősítő szilárdságra

m'_c	m'_w	m'_a	x	V'_p	$\Delta V'_p$	x'	R_o	R
125	193,5	1995,2	1,548	233,8	-10,4	1,548	3,4	2,9
193,5	193,5	1964,4	1	255,9	+11,7	1,015	10,1	9,3
250	196,5	1905,7	0,787	277,1	+32,9	0,823	16	14,7
300	201,5	1852,6	0,672	298,2	+54	0,718	21,1	19,3
350	206,5	1796,8	0,59	319,4	+75,2	0,655	25,1	23
400	211,5	1741	0,529	340,5	+96,3	0,606	28,9	26,6
450	216,5	1985,2	0,481	361,7	+117,2	0,570	32,3	29,6
500	221,5	1629,4	0,443	382,8	+138,6	0,542	35,1	32,2
550	226,6	1573,4	0,412	404	159,8	0,522	37,4	34,3

Balázs György a műszaki tudományok doktora *opponensi véleménye* Ujhelyi János doktori értekezéséről,

Gyengő Tibor a műszaki tudományok doktora *hivatalos bírálói véleménye* Ujhelyi János doktori értekezéséről,

Kunszt György a műszaki tudományok doktora *opponensi véleménye* Ujhelyi János doktori értekezéséről,

Ujhelyi János *válaszai* az opponensi véleményekben megfogalmazott észrevételekre

Balázs György
a műszaki tudományok doktora
opponensi véleménye Ujhelyi János doktori értekezéséről

Az értekezés az irodalmi hivatkozásokkal együtt 127 oldal, melyet 10 táblázat (számpélda) egészít ki. Az értekezés szövege közt található 81 ábra (nem számítva a tézisek közötti ábrákat) és 4 tervezési séma.

Az értekezés általában

1) A beton a legnagyobb mennyiségben készített építőanyagunk és hosszú időn át az is marad. Régóta megvan az a törekvés, hogy a betont ne véletlenszerűen, hanem a követelményeknek megfelelően, céltudatosan és minél gazdaságosabban állítsák elő. Vagyis az szükséges, hogy az empíriát minél inkább a tudományos betonismeret váltsa fel. Ujhelyi doktori értekezését azért tartom nagy jelentőségűnek, mert a tudományos megismerést segíti elő, a gyakorló mérnök számára ajánlott képleteket a betonstruktúrából vezeti le.
2) Az értekezés jelentőségét növeli, hogy egyrészt egy életművet foglalt rendszerbe, másrészt a beton megismerését nemcsak művelte, hanem terjesztette is. Az MI-04.19-81 „Beton és vasbeton készítése” c. ágazati irányelv a világ egyik legkorszerűbb előírása. Az irányelv olyan ismereteket tartalmaz, amely a betontervezést ugyan bonyolultabbá teszi a korábbi irányelveknél, de számítógéppel könnyen használható. Az irányelv egy fejlődés eredménye, amely tartalmazza Ujhelyi kutatásai során bekövetkezett fejlődést és tartalmazza a gyakorlati ellenőrzések során felmerült problémák kiküszöbölését is.
3) Jelölt az értekezését nagy elméleti felkészültséggel, az igen nagy külföldi s hazai szakirodalom ismeretében és kritikai szellemű felhasználásával készítette el, téziseit az általa végzett kísérletekkel igazolta, munkája során új vizsgálati módszereket dolgozott ki. A betonismeretet jelentősen továbbfejlesztette.
4) Az értekezés rendkívül tömör. A tömörség nem megy a logikus felépítés, érthetőség rovására. Szövege megfelel a magyar nyelv követelményeinek, ábrái jól szerkesztettek, a mondanivalóra összpontosítanak. Az értekezés esztétikusan kiállított.
5) Szerencsésebbnek tartanám, ha az értekezés címe „A beton nyomószilárdságának struktúra szemléletű tervezése” volna, mivel egyéb követelményeknek megfelelő betonok tervezésére az alapismereteket fel lehet ugyan használni, de erre a jelölt legfeljebb csak utalt.

Az értekezésről részleteiben

Az értekezés 9 fejezetből áll.

A 2 oldalnyi bevezetésben jelölt röviden összefoglalja a betonnal szembeni követelmények változását. Még mindig leggyakoribb követelmény a nyomószilárdság, de az egyéb követelményeket (pl. korrózióállóság) már nem lehet, vagy nem elég megbízhatóan lehet a nyomószilárdságból levezetni. A beton tönkremeneteli folyamataira hívja fel a figyelmet, rámutat arra, hogy a repedésképződés annál korábban megindul, minél több a betonban a lokális hiba. Végül vázolja, hogy az értekezésben a beton nyomószilárdságának a struktúra szemléletű tervezésével foglalkozik.

A 2. fejezet az alkalmazott jelölések jegyzéke.

Az értekezés 3. fejezete a betonkeverék vízszükségeltének a becslésével foglalkozik. A bevezetésből az olvasható ki, hogy a vízigény becslése optimumkereséséi feladat, mivel a könnyebb bedolgozhatóság több vízzel, a nagyobb szilárdság, vízzáróság, stb. kevesebb vízzel érhető el. A vízigénybecslés fontosságára utal, hogy Ferettel kezdődően egy évszázada foglalkoznak vele. Jelölt a kutatók tevékenységét 3 csoportba sorolta:

a) A cement + adalékanyagra szemcsemérettartományonként, vagy az átlagos szemnagyság függvényében adnak meg vízigényt és a beton vízigényét összegezéssel számítják ki (Feret, Bolomey, Leviant, Horváth).

b) A kutatók másik csoportja a cement vízigényét tartja elsődlegesnek (Abrams, francia Híd- és Útügyi Szövetség, Suenson, Alexanderson).

c) A harmadik csoport az adalékanyag vízigényét veszi elsődlegesnek és a cement vízigényét csak bizonyos cementtartalmon felül veszi számításba (Scholz, Rothfuchs, Palotás, Popovics, Szizov, Bazsenov, Kausay). Rámutatott jelölt arra is, hogy egyes szerzők (pl. Armuth 300, Szizov 350 kg/m^3-ig) nem veszik számításba a cement vízigényét.

Jelölt – 300 kg/m^3 cementtartalom esetére – a vízigényt valamennyi szerző által javasolt módon kiszámította és az adalékanyag finomsági modulusa függvényében ábrázolta.

Ujhelyi vízigény-becslő képletei kidolgozásakor abból indult ki, hogy mind a cementnek, mind az adalékanyagnak külön meg kell határozni a konzisztenciától függő vízigényét, mert szemcseméretük lényegesen eltér egymástól. Mivel a szabványos konzisztenciamérő módszerek a friss betonkeverék más-más anyagjellemzőit mérik, ezért a megadott konzisztenciahatárokat nem tartja egymásba átszámíthatónak valamennyi betonösszetétel esetére. Ezért új módszert dolgozott ki, amelyben a betonkeverék víztartóképességét tekinti a bedolgozhatóság olyan jellemzőjének, amelyre a vízigénybecslést alapozni lehet. Külön meghatározta a cement (8. ábra), a homokoskavics (12. ábra) és a betonkeverék 13. ábra) vízigényét.

Kísérletei alapján szerkesztette meg a 15. (elvi) ábrát, amellyel a beton cementtartalma függvényében a beton vízigényét magyarázta. A konkrét számításhoz összefüggéseket adott meg.

Gondolataim a fejezet olvasása közben:

a) A víztartóképesség meghatározásának az elvén alapuló vízigénybecslő módszert alkalmasnak látom a vízigény általános becslésére. Jelölt azonban csak a gyári cementekkel, a legáltalánosabban használt dunai homokoskaviccsal ellenőrizte azt. Milyen változást vár az 550 pc, a zúzott adalékanyag esetére? A 12. ábrán a finomsági modulus szerepel az abszcisszán. Gondolt-e arra, hogy Popovics finomította Abrams betontechnológiára vonatkozó egyik törvényét, nevezetesen betontechnológiailag azok a szemmegoszlások egyenértékűek (azonos adalékanyag esetére), amelyeknek mind a finomsági modulusa, mind a fajlagos felülete azonos. Milyen változást jelent a szokásosnál több finomhomok vízigénye?

b) A gyakorlatban megkülönböztethetőnek tartja-e a képlékeny, a folyós és önthető konzisztenciájú betonok vízigényét, mivel a vibrálás időigénye 0,1–3 között változik, ami az építőiparban megszokottnál pontosabb (szubjektív) mérést igényel.

Az értekezés 4 fejezete az adalékanyag pépigényét vizsgálta.

Jelölt szerint meghatározó szerepe van annak, hogy a beton készítésekor mennyi adalékanyagot lehet a zsaluzatba a legtömörebben bedolgozni. Tehát nagy szerepe van a beton tömörségének, ill. hézagtartalmának, mert utóbbit kell cementpéppel kitölteni.

Az adalékanyag szemmegoszlásának a jellemzésével az elmúlt évszázadban sok kutató foglalkozott. A legnagyobb tömörséget adó adalékhalmazok az ideális szemmegoszlási görbékkel jellemezhetők. A II. világháborúig a nagyon tömör útbetonokat a Fuller-görbe szerinti adalékanyaggal építettek. Az aszfaltútépítésben a Rothfuchs szerinti, a betonépítésben általában a Bolomey szerinti ideális szemmegoszlási görbéket alkalmazták.

Nagy jelentősége volt az Abrams-féle finomsági modulus bevezetésének, amely a szemmegoszlás jellemzésére egy számot ad meg, amelyet lényegében ma is használunk, hasonló jellemző a Hummel-terület, Spindel dekadikus finomsági modulusa, Popovics finomsági modulus és fajlagos felület együttes használata, Kausaynak a térfogati fajlagos felülete.

Ugyancsak nagy jelentősége volt a határgörbés jellemzésnek és a Palotás által bevezetett optimális finomsági modulusnak.

A péppel bevonandó felület számítására is dolgoztak ki kísérleti és számítási (pl. Palotás, Schlichter, Kézdi) eljárásokat.

Jelölt azon túl, hogy a tömörség meghatározására szolgáló összefüggéseket elemezte, módszert dogozott ki az adalékhalmaz tömörségének és ebből következően pépigényének a meghatározására. Arra az új eredményre jutott, hogyha a tömörséget a finomsági modulus függvényében ábrázolta, akkor minden d_{max} esetére maximumpontot mutató függvényt kap. Adott d_{max}-hoz tartozó szemmegoszlási görbe alakját a talajmechanikából átvett, módosított egyenlőtlenségi együtthatóval jellemezve összefüggéseket vezetett le a tömörség, a finomsági modulus és az egyenlőtlenségi együttható között. Ugyancsak összefüggéseket dolgozott ki az adalékhalmazok pépigényére is $k_s < 40$ konzisztenciamérőszámú betonok esetére, figyelembe véve a konzisztencia változásából adódó vízigény változását.

Gondolatom: Egyetértek azzal, hogy a beton legkedvezőbb tulajdonságait a legtömörebb betonnal lehet elérni. Az Építőanyagok Tanszékén megkülönböztetjük az adalékváz hézagtérfogatával egyenlő elméleti s az ennél nagyobb, a szemcsék bevonásához is szükséges gyakorlati pépigényt. Jelölt egyetért-e ilyen megkülönböztetéssel? Pépigényszámításai során melyiket veszi figyelembe?

Az értekezés 5. fejezete a beton nyomószilárdságának a becslésével foglalkozik.

A kutatókat kb. 100 éve foglalkoztatja az a kérdés, hogy a nyomószilárdság és valamelyik fontos betonjellemző között függvényt állítsanak fel. A kutatók nagy része – a beton nyomószilárdságát befolyásoló tényezőket változtatva – kísérleteket végzett és empirikus függvényt állított fel a nyomószilárdság és a víz-cement tényező között. Így Abrams, Graf exponenciális függvényt, Abrams hatványfüggvényt, Graf, Bolomey, Palotás hiperbolikus függvényt, Feret, Suenson, Talbot, Weiss parabolát készített. A képletekben szereplő állandókat számítással rendszerint úgy határozták meg, hogy a hibanégyzetek összege minimális legyen. Ilyen képlet a hazai cementekre felállított Bolomey-Palotás képlet, amelyet – egyszerűsége miatt – ma is használunk.

A kutatók másik része lényegében a beton porozitása és szilárdsága között keres összefüggést. Azt hiszem, hogy ide sorolható Feret és Powers képlete és egyértelműen ide sorolandók Balshin, Rychkevitz, Schiller stb. képletei is. Utóbbiak a pórusmentes beton szilárdságát és az összes pórustartalmat szerepeltetik független változóként. Utóbbi időben bonyolítják a képleteket azáltal, hogy a cementkő és az adalékanyag közötti tapadást is beépítik a képletbe.

Valójában a víz-cement tényezőnek a szerepeltetése független változóként szintén közelítően a beton levegőtartalmát fejezi ki, mivel a vízből a cementre vonatkoztatva csak 15-20 % használódik el a hidratációhoz, míg a többiből pórustartalom lesz. Mivel a jól bedolgozott betonban is marad 10-20 l/m^3 levegő, továbbá a könnyű adalékanyagnak igen nagy lehet a porozitása és fagy-sózásálló betonokba mesterségesen viszünk be 4-6 térfogatszázalék légpórust, ezért már kb. 50 éve a szilárdságbecslő képletekbe a víz-cement tényező helyett a víz-levegő-cement tényezőt építették be. Ennek a határesete a víz-cement tényezős képlet arra a esetre, amikor a pórustartalom egyenlő zérussal. Hazánkban a Bolomey képletben először Palotás használta a víz-levegő-cement tényezőt és Jelölt bizonyította, hogy az ilyen képletek alkalmasak könnyűbeton tervezésére is.

Jelölt helyesen mutatott rá arra, hogy a próbatest, amelynek szilárdságából az empirikus képleteket levezették, kevésbé jól tömöríthető, mint a nagyobb méretű műtárgy. De még a próbatestek készítése között is van különbség. Erre utal az a tény, hogy Palotás 1950-ben

megjelent „Minőségi beton” c. könyvében más állandókat adott meg, mint az 1980-ban megjelent „Mérnöki szerkezetek anyagtana” c. könyvben.

Jelölt Feret, Powers, Abrams és Bolomey képletekből 3 saját kísérletsorozata alapján kiszámította a pórusmentes beton szilárdságát és azt a víz-cement tényező függvényében ábrázolta. Megállapította, hogy a hazánkban is használatos függvények jól illeszkednek 150-500 kg/m^3 cementtartalom, 0,4-1,2 víz-cement tényező és folytonos szemmegoszlású adalékanyagok esetén. Vagyis azokban az esetekben, amelyeket a képletek állandóit meghatározták. Általános törvényszerűségek kifejezésére azonban nem alkalmasak.

Kérdésem: A vizsgált függvények empirikus függvények, amelyeknek az állandóit Jelölt a kísérleti eredményekből vezette le. Úgy értsük-e, hogy a vizsgált képletek közül nem mind használható az x = 0,7-1,2 tartományban?

Hogyan tudta elérni, hogy a víz el ne távozzon a próbakocka készítése során?

Ellenőrizte méréssel is a tömörséget, ill. azt, hogy levegő a friss betonban nem maradt?

Jelölt az extrém esetekre is kiterjedő részletes kutatást végzett (6. fejezet). Jelölt nagy tapasztalatára utal az a gondosság, ahogy a kísérlet ellenőrzésére szolgáló módszereket kiválasztotta. Extrém betontartományokról lévén szó, a konzisztenciát a Vebe-méterrel és a Glanville-készülékkel vizsgálta. Egységesítette a beton készítését, figyelembe vette a kötött víznek a víz-cement tényezőtől való függését, kiküszöbölte a hidratációhő okozta struktúrahibákat. A gondos utókezelésnek, a tárolásnak a hatását jól szemlélteti a 41. ábra. Ilyen gondos feltételeket teremtve határozta meg a gondosan tömörített pépek nyomószilárdságát a víz-cement tényező függvényében, kétféle cementtel. Továbbiakban Jelölt – helyesen – abból indult ki, hogyha a pórusmentes beton szilárságát ábrázolja a víz-cement tényező függvényében, azoknak a görbéknek a cementpépekre meghatározott görbékhez kell csatlakoznia. Hipotézise szerint a függvény másik végpontja a nagy víz-cement tényezőjű betonok nyomószilárdsága. Ezt a hipotézist, amelyet a 42. ábrán vázolt fel, 16 mm maximális szemnagyságú, 3 féle szemmegoszlású, négyféle konzisztenciájú betonokkal igazolta és felállította a konzisztenciától függően a szilárdságbecslő képleteket. A függvényeknek három jellemző szakasza van, az elsőben a beton annyira túltelített, hogy pépként viselkedik, a második szakasz a péptelített és a kissé túltelített betonok tartománya, míg a harmadik szakasz a péptelítetlen betonokra vonatkozik.

E fejezet további részében Jelölt a péptartalom és a pépigény különbségnek a pórusmentesnek feltételezett betonok szilárdságra való hatását vizsgálta. Új eredmény az, hogy a beton nyomószilárdsága lényegesen függ a péptelítettségtől. Legnagyobb a péptelített beton szilárdsága (adott víz-cement tényezővel). A telítetlen betonoké – ehhez képest – a péphiány függvényében közel lineárisan, rohamosan csökken. A túltelített betonok szilárdsága – a péptelített betonokéhoz képest – annál nagyobb mértékben csökken, minél kisebb a víz-cement tényező, míg a pépjellegű betonoké már változatlan. Az első és a második tartományban lévő túltelített beton úgy viselkedik, mintha meg növekedett volna a víz-cement tényezője. Jelölt mindkét tartományra vonatkozóan x’ módosított víz-cement tényezőt vezetett be és ennek a számítására képletet adott. Az x’-t túltelített betonoknál kell csak számításba venni. Péptelített betonokra x’ = x veendő figyelembe. A levezetett egyenletek felhasználásával szerkesztette meg az 50. ábrát, amelyiken a gondosan tömörítettnek feltételezett beton szilárdságát a pépigényhez viszonyított péptartalom függvényében ábrázolta.

További kísérleteiből arra a következtetésre jutott, hogyha a konzisztencia állandó, akkor növekvő péptartalomhoz növekvő szilárdság tartozik. Ha a konzisztencia is és a pépigény is állandó, a legnagyobb szilárdságot a péptelített beton eredményezi. Ezeket a megállapításokat kísérleteink is alátámasztják.

Kérdés: Mi a hatása a tényleges betontömörségnek és módosítja-e az összefüggéseket?

A leghosszabb 7. fejezet ad módszert a beton nyomószilárdságának a tervezésére.

Jelölt arra az esetre, ha a frissbeton levegőtartalma elhanyagolható, feldolgozta kísérleteit és meghatározta az Abrams-képlet állandóit, az x helyére az általa bevezetett x'-t helyettesítve (57. ábra). Mivel a gyakorló mérnöknek nem állnak rendelkezésére az x meghatározásához szükséges jellemzők a szabványos határgörbékhez – kísérletei alapján – megadta a víz-cement tényezőt a cementtartalom, d_{max} és konzisztencia függvényében. Korrekciós tényezőket adott meg arra az esetre, ha az adalékanyag agyag-iszap tartalma 3 %-nál nagyobb. Ugyancsak megadta az x-ből az x' kiszámításához szükséges módosító tényezőket. Ismertette az x' számításának a lépéseit arra az esetre is, ha x' számításához szükséges jellemzők ismertek. Számítási menetet is bemutatott mindama betontervezési esetekre, amelyek a gyakorlatban előfordulnak. Míg egyrészt tervezési módszerének a használhatóságát számpéldával is igazolta, másrészt bemutatta, hogy a minősítési értékből kiindulva hogyan lehet a nyomószilárdság várható szórását figyelembe venni.

Ugyanabban a fejezetben összehasonlította kutatási eredményeit az Építőanyag Tanszék kutatóinak (Thanh, Zsigovics, Balázs) eredményeivel. Az összehasonlításhoz fűzött magyarázatát elfogadom.

Gondolatok a fejezet vizsgálata során:

a) A 98.oldalom írja: a FN-KK cementpépek nyomószilárdsága normális (+ 20°C) tárolás mellett az x csökkenésével csökken, és csak akkor lehet növekvő pépszilárdságot nyerni, ha a tárolási hőmérsékletet mérsékeljük, elkerülve ezzel a hidratáció okozta diszlokációkat. Feltételezhető, hogy x < 0,4 víz-cement tényezőjű betonkeverékek szilárdulása alacsonyabb kezdeti tárolási hőmérséklettel fokozható. Bár a diszlokáció fogalmába sok minden belefér, hőmérséklet méréseink alapján azt semmiképpen nem látom elfogadhatónak, hogy a 15 cm élhosszú kockában a hidratáció ilyen mértékű káros deformációt okozna. A kezdeti hidegtárolásnak kétségtelenül van előnye, ezt sok kísérletünk igazolta, okát azonban a Richartz-féle magyarázatban látják, nevezetesen: hidegben hosszúrostú CSH-ok keletkeznek nagyobb mennyiségben és ezek a nagyobb szilárdság okozói. Egyébként a kezdeti hidegtárolást egy szabványos vizsgálatba nem tartom beilleszthetőnek.

b) Jelölt szerint a legnagyobb viszonylagos nyomószilárdság x ~ 0,4 esetén érhető el. Ennek, Taplin adataira hivatkozva, azt a magyarázatát adta, hogy 28 napos korban – a beton 28 napos nyomószilárdságára gyakorolt hatását tekintve – csökken a cement hidratációja x < 0,4 esetén. Ok: cementkőváz diszlokáció hidratációhő miatt. Wesche magyarázata szerint x = 0,4 esetén végbement a teljes hidratáció, megszűnik a kapilláris porozitás. A II. világ-háború előtt megépített betonokat igen szigorú szabályok szerint építették. Tömörségük 20-30 éves korban 95-97 % volt. A porozitást többnyire légbuborékok alkották. Kísérleteink szerint, ha nagyon kicsi a víz-cement tényező és megfelelően tömörítettük betont, gátolt hidratáció lépett fel, mert nem volt elég hely a hidráttermékeknek. Ez a körülmény, különösen idősebb korban, szilárdságcsökkenést eredményezett, de oka – véleményem szerint – nem a hidratációhő.

A 8. fejezet „ A betonstruktúra tervezése" címet viseli. Jelölt a betont – kutatásai során – kétfázisú rendszernek tekinti, amelyben az adalékanyag különböző méretű inert szemcséi a cementkővázba vannak beágyazva. Ezt az értekezés elején lett volna célszerű megadni. Jelölt ebben a fejezetben vizsgálta, hogy a betonstruktúrára hogyan hatnak a beton alkotói (m_c, D, V, határgörbék stb.). Úgy vélem, hogy Jelölt ebben a fejezetben újat nem állít, ill. nem bizonyít.

Gondolataim a fejezet tanulmányozása során:

a) Úgy ítélem meg, hogy az értekezést jobban fedte volna „a beton nyomószilárdságának a struktúra szemléletű tervezése” cím.

b) Úgy vélem, hogy az értekezés érvényességi tartományát egyértelműen meg kellett volna adni: pl. természetes homokos kavicsra, a természetes szilárdulású betonra érvényes. Célszerű lett volna utalni arra, hogy a levezetett egyenletek hogyan érvényesek zúzott adalékanyagra, valamint a kvarckavicsnál nagyobb vízfelszívású anyagokra.

c) A struktúra szemléletű betontervezés korszerű, előremutató, tudományos irányzat. Lát-e reményt arra, hogy az empirikus elemek valamikor kiküszöbölhetők lesznek?

d) Jelölt által korábban szerkesztett Műszaki Irányelvekben – Palotás-Bolomey képletre alapozva – jól áttekinthető, könnyen kezelhető táblázatok segítik a kivitelezőt. Jelölt új tudományos eredményei alapján elkészítendő irányelvek mennyivel lesznek bonyolultabbak? Foglalkozott-e a gazdaságosság kérdésével?

e) Jelölt által kidolgozott struktúra szemléletű betontervezést alkalmasnak tartja-e a húzószilárdság, a vízzáró, a kopásálló, a fagy – és sózásálló beton tervezésére?

Az értekezés tézisei

Jelölt a 9. fejezetben az új tudományos eredményeket foglalta össze.

Az értekezés tézisei közül az 1., a 2., a 3., a 4., az 5., a 6., a 8., a 9., a 10. tézist olyan új tudományos eredménynek fogadom el, amely a betonismeret jelentős fejlesztéséhez és ezen belül a betonszilárdság tervezése struktúra szemléletű megalapozásához elismerésre méltóan hozzájárult.

A 7. tézist nem fogadom el, mivel a betont bonyolultabbnak tartom annál, minthogy a betonösszetétel gazdaságosságát a cement fajlagos tömegére vonatkoztatott nyomószilárdsággal jellemezni lehetne. A gazdaságosság vizsgálata során nem szabad figyelmen kívül hagyni a költségtényezőket. Nem látom bizonyítottnak, hogy a betonösszetétel $x \sim 0{,}4$ víz-cement tényező esetén a leggazdaságosabb. Ezt a tézist egy kiérleletlen gondolatnak tekintem.

A 11. tézist egy példának, és nem új tézisnek tekintem.

A 12. tézist sem fogadom el. Olyan gondolatnak tekintem, miszerint a bemutatott struktúraszemléletű betonismeret más területre is kiterjeszthető lesz és alkalmas lesz új tudományos értekezések témájául.

ÖSSZEFOGLALÁS

Jelen értekezés eleget tesz az előírásokban a doktori értekezéssel szemben támasztott követelményeknek, ezért vitára bocsátását és a doktori fokozat odaítélését javasolom.

Budapest, 1990. 05. 26. Balázs György s.k., a műszaki tudományok doktora

Gyengő Tibor

a műszaki tudományok doktora

hivatalos bírálói véleménye Ujhelyi János doktori értekezéséről

1. Az értekezés témája

A beton struktúrájának és nyomószilárdságának tervezése a magyar betonépítő gyakorlatban a kezdettől fogva alapvető fontosságú kérdés. Tekintettel arra, hogy a beton a hazai építőiparnak nemcsak a múltban volt, hanem a jövőben is egyik legfontosabb építőanyaga lesz, annak szakmailag és gazdaságilag helyes megalkotása mind tudományos, mind gyakorlati szempontból alapvető fontosságú.

A beton egy többféle anyagból összetett, heterogén anyag, annak minősége tehát nagyon sokféle módon és kombinációval módosítható, alakítható. A betontechnológusok, a kutatók a kezdettől fogva intenzíven foglalkoznak is a kérdéssel, mégis a kutatómunka befejezettnek nem tekinthető, amihez hozzájárul az is, hogy az egyes építőanyagfajták fejlődésükkel állandóan változásban vannak.

Minden olyan munka, amely e téren az alapkutatásból kiindulva a gyakorlatban felhasználható új, alkalmazott kutatási eredményeket hoz, a köz számára hasznosnak tekinthető. Az értekezés témája, tekintettel arra, hogy az említett területhez tartozik és az építőgyakorlatban felhasználható új eredményeket tartalmaz, népgazdaságilag hasznos s összhangban áll a társadalmi fejlődés követelményeivel; az fontos és helyes.

2. Az értekezés részletes elemzése

Az értekezés életmű jellegű, összefoglaló munka. A benne foglalt, nagyon kiterjedt és alapos tudományos munkát Jelölt nagyrészt a hivatalos munkaköréhez tartozó Beton és vasbeton készítése című műszaki irányelvek (jelenlegi száma: MI 04.19-81) – két évtizednél hosszabb idő alatt, több, időközben fejlesztett, módosított formában kidolgozott – megalkotásához fáradhatatlan munkával és tudományszeretettel fejtette ki. Az értekezés a munka érdemi részét és annak révén elért új tudományos eredményeket foglalja össze.

Fejezetenkint külön-külön tárgyalja elsősorban a heterogén beton szilárdságára kiható tényezőket, azok változásainak és az egyes kutatóknak ezekből korábban következtetett hatásait. A fejezetek elején részletesen és kritikusan elemzi a vonatkozó tényezőt és annak befolyását tárgyaló hazai s külföldi szakirodalmat. Utána az abból, hosszú munkával, nagyon sok kísérlettel elért eredmények segítségével dolgozza ki és szögezi le az általa elért és a korábbinál jobb eredményeket szolgáltató, a gyakorlatban közvetlenül felhasználható tudományos eredményeket.

Vizsgálatait és azok értékelését a péptelítettség fogalmából kiindulva és annak, mint jelentős tényezőnek a figyelembevételével végezte. Ezt azért hangsúlyozom, mivel a péptelítettség, mint befolyásoló tényező figyelembevételének egyik kezdeményezője Jelölt volt és ez a betontervezés munkájában jelentős előrelépést jelentett.

Helyesen állapítja meg, hogy a betonstruktúra az alapanyagok, a keverési arány és a készítési technológia kölcsönhatásából alakul ki. Helyes tehát, ha a kölcsönhatások vizsgálatával tárja fel azok hatását a struktúrára, mert ezek ismeretében a hibák, a kedvezőtlen hatások korlátozhatók. Jelölt a vizsgálatok alapján matematikai összefüggéseket (függvényeket) dolgozott ki, amelyek segítségével a struktúra tervezhető és a tervezett beton tulajdonságai nem tapasztalati összefüggésekből, hanem a struktúra alapján megbízhatóan becsülhetők.

Az első három fejezetben részletesen foglalkozik külön-külön a legjellemzőbb tényezőkkel, azok hatásával és optimális becslésével, majd ezek alapján a következő három fejezetben azok együttes hatását tárgyalja a beton teljes megtervezésére és javaslatokat tesz a végrehajtására.

Az első érdemi fejezet (3) a betonkeverék vízszükségletét tárgyalja. A vízigény becsléséhez, meghatározásához elkerülhetetlen a betonkeverék konzisztencia mérése is. Jelölt az ismert, többféle konzisztenciát mérő módszerekkel dolgozott és megállapította, hogy az azokkal elért eredmények – bár azonosaknak kellett volna lenniök – egymástól eltérők voltak. Ez abból következett, hogy minden konzisztencia vizsgáló módszer a friss betonkeverék más-más anyagjellemzőjét méri. Jelölt kutatási tevékenységének érdeméül hozható fel, hogy kutatásai során eredményesen alkalmazott egy, általa kidolgozott, újfajta konzisztencia vizsgálati módszert, amely a keverék víztartóképességén alapszik a vizsgálat közben, tömörítés alatt. A módszer a betonkeverék bedolgozhatóságának megállapítására elég megbízható.

Jelölt a fejezet végén a különféle vízigény meghatározó módok értékelése alapján a betonkeverék vízadagolására matematikai képleteket ad.

A következő fejezet (4) az adalékanyag tömörsége és pépigénye közötti összefüggéssel foglalkozik. A betonkeverék lehető legnagyobb mértékű tömöríthetősége nagyon fontos tényező, aminek alapvető kiindulási feltétele a szemcsés halmazok tömörsége. Ezzel a kutatók már a múlt század vége óta foglalkoztak, mert azok térfogatától függ az optimális betonkeverékhez szükséges cementpép-igény.

A kutatók által végzett vizsgálatok eltérő eredményei vitték rá Jelöltet, hogy vizsgálja az eltérések okait és abból következtetve egy megbízhatóbb becslési eljárást dolgozzon ki. Vizsgálatai sok szempontra rámutattak, amelyek között már ismertek is voltak. Javaslatokat is dolgozott ki. Felteszem a kérdést, hogy a pépigényre vonatkozó eredményeit véglegesnek tekinti-e?

Nagyon fontos fejezete az értekezésnek a beton nyomószilárdságának a becslésére vonatkozó (5). Nagyon jó gyakorlati érzékkel elemzi és bírálja a szilárdságra kiható technológiai módokat és lehetőségeket alátámasztva saját kísérletekkel. Megállapította, hogy a víz--cement tényező befolyása a nyomószilárdságra csak más paraméterekkel kölcsönhatásban vizsgálható, amely következtetésre mások is – ha nem is ennyire határozottan – már rájöttek.

De máshol is mond kijelentés jellegű állításokat, amelyek már ismertek. Ezeket én fogalmazás jellegű hibának tekintem.

Az említett fejezetek után (6) a cementkötésű keverékek teljes vizsgálatának a tárgyalására. Ebben a fejezetben felhasználja a korábbi három fejezetben tárgyalt tényezőkre megállapítottakat. Azok felhasználásával a beton nyomószilárdságának a becslésére, ill. tervezett szilárdságú betonok összetételének tervezésére a gyakorlatban megbízhatóan alkalmazható összefüggéseket dolgoz ki.

A következő (7) fejezet az eddigi kísérleti és szakirodalmi adatok felhasználásával kidolgozott összefüggések és kísérleti eredmények alapján a Jelölt által kidolgozott tervezési módszerrel és algoritmussal foglalkozik az előirányzott szilárdságú beton összetételének megtervezésére. Ez tulajdonképpen a korábbi fejezetekben kidolgozott részeredmények összefoglalása. Az összefoglalást a gyakorlati alkalmazás sorrendjében logikusan végzi; annak felhasználása a gyakorlati szakemberek számára mégis bonyolultnak tűnik annak ellenére, hogy azt közismert gyakorlati tanácsokkal és javaslatokkal igyekszik érthetőbbé tenni és a számítással kapott eredmények várható pontosságára, szórására utalni.

A 7. fejezettel azonos jellegű az eredményeket és a módszereket összefoglaló, utolsó érdemi fejezet (8), amely a betonstruktúra tervezésére, a péptelítettség fogalmára alapozva, kidolgozott javaslatát foglalja össze az alkalmazás gyakorlati feltételeinek megemlítésével.

Az értekezés a formai követelményeknek megfelel. Terjedelme 129 gépelt oldal és 81 sorszámozott ábrát, valamint egy rövid, 10 oldalas táblázatos függeléket tartalmaz. Hiányolható, hogy az ábráknak nincs címfeliratuk.

3. Az értekezés tudományos értékelése

Jelölt az értekezésében elsősorban a beton nyomószilárdsági tervezésének elemzésével és gyakorlati tervezési módszer kidolgozásával, szinte életművet képező, jelentős alap- és alkalmazott tudományos kutató munkájáról tesz tanúbizonyságot. Kutatási eredményeinek nagy része már nyomtatásban közzétett. Jelölt kutatási eredményei egyéni tudományos eredmények, bár az értekezés egy-két helyén (23, 33 és 49 oldal két helyén és a tézisek 1 oldal) többesszámot használ, de ez ismereteim szerint csak fogalmazási hiba. A kutatási eredmények értékét növeli, hogy az egyes alapkutatási eredményekből az építőipari gyakorlatban felhasználható, közhasznú megoldásokat dolgoz ki. Munkája tehát az élettől nem elszakadt, csak szűk körre vonatkozó elméleti értékű, hanem a betonépítési gyakorlatban hasznosan érvényesíthető, érvényesített.

Az értekezés több olyan tudományos eredményt, felismerést, egyes empirikus ismeretekre kísérleti és elméleti igazolást tartalmaz, amelyek jelentősen hozzájárultak és hozzájárulnak a betontechnológia tudományának alaposabb megismeréséhez s gyakorlati fejlesztéséhez.

Jelölt a részben alapkutatásnak, részben alkalmazott kutatásnak minősülő munkáját nagy elméleti felkészültséggel, a tudományos kutatás korszerű módszereivel, a hazai és a külföldi szakirodalom alapos ismeretében és kritikus szellemű felhasználásával, a kísérletek végzéséhez szükséges nagy gyakorlattal, sőt új kísérleti módszer kidolgozásával végezte.

Az értekezés logikusan felépített, jó összefoglaló munka. Nyelvezete világos, műszaki nyelvhasználata szabatos és helyes.

Az értekezés hátrányaként minősítem, hogy túl tömören fogalmazott, ezért nehezebben követhető és a gyakorlati felhasználásra kidolgozott tervezési algoritmusai kissé bonyolultak. Javasolom – ha tudja – hogy ezeket a jövőbeni munkája során egyszerűsítse, tegye népszerűbbé.

Apróbb hátránya az értekezésnek, hogy az elején felsorolt „alkalmazott jelölések” listája nem egészen teljes. Van néhány jelölés, amelyet csak az alkalmazás helyén definiál. A jelölésekben nem szerencsés, hogy egy-kettőnél ugyanazzal a betűvel jelöl egy fogalmat, de egy index hozzátételével egészen más jellegű (m pl. a finomsági modulus jele, de m egy idexszel kiegészítve tömegadatot jelöl).

4. Az értekezés tézisei

Az értekezés tézisei a követelményeket kielégítők. Nem tartom egészen helyesnek, hogy a pontokba foglalt új tudományos eredmények némelyikének, azok közlésének bevezetéseként a kérdésre vonatkozó, régi idők óta ismert tényeket is, mint alapot, közöl.

A 12 pontba foglalt eredményeket a 7. és a 11. pontban foglaltaktól eltekintve olyan jelentős, új tudományos eredményekként elfogadom, mint amelyek a betonstruktúra jobb megismerésére és tervezésére újat hozók és hozzájárulnak a betonstruktúra bonyolult voltának jobb megismeréséhez és a jobb betontervezés érdekében új tudományos eredményeket tartalmaznak, továbbá alapot képeznek a betontechnológia területén a még mindig nem teljesen tisztázott és további ismeretanyagot eredményező újabb kutatásokhoz.

A 7. pontban foglaltakat, mint a betonösszetétel gazdaságosságár vonatkozó megállapításokat csupán egy összehasonlító, gazdasági becslésnek tartom.

A 11. pontban foglaltak pedig az MSZ 4720 sz. szabvány szerinti betonszilárdságokhoz igazodás becslése a javasolt új tervezési módszerekkel elért értékekhez viszonyítva, tehát nem tudományos eredmény.

5. Összefoglaló javaslat

Az előadottak alapján az értekezést, mint a társadalmi fejlődés követelményeivel összhangban levő, a betontechnológia tudományának fejlődését eredményesen szolgáló, jelentős új kutatási eredményeket tartalmazó, életművet összefoglalónak tekinthető, korszerű tudományos módszerekkel végzett és a szakirodalmat helyesen és kritikusan felhasznált, hosszú éveken keresztül kifejtett kutatás alapján kidolgozott munkát nyilvános vitára bocsátani javasolom.

1990. május 12.

Gyengő Tibor s.k.
a műszaki tudományok doktora

Kunszt György

a műszaki tudományok doktora

opponensi véleménye Ujhelyi János doktori értekezéséről

Közismert, hogy az elmúlt több mint 100 év folyamán a beton – elsősorban az alkalmazás világméretű tömegességét illetően – a mély- és magasépítés legfontosabb anyagává vált. Igaz ugyan, hogy az utolsó két évtizedben egyre mértékadóbbá váló külföldi, majd hazai környezetvédő mozgalmak tiltakoztak az ellen, hogy – amint ezt agitációik során megfogalmazták – „betonsivataggá silányítsuk természeti környezetünket", vagy „gigantomániás betonlétesítményekkel veszélyeztessük tájainkat és városainkat", s az is tény, hogy igen erős szakmai és társadalmi tiltakozást váltott ki a beton egyes országokban szinte totálissá nőtt hegemóniája a tömeges lakásépítésben. Mégis, minden prognózis azt mutatja, hogy a beton alkalmazása – egyes vadhajtásainak kívánatos levágás után – a jövő században is meg fogja tartani vezető szerepét, a mélyépítésben szinte kizárólagosan, de valószínűleg a magasépítésben is jelentős mértékben.

Mindezek alapján jól érthető, hogy egyrészről a friss beton alkotói, ezek összetétele, betonná keverésük és tömörítésük módja, másrészről a megszilárdult beton tulajdonságai közötti összefüggés tudományos vizsgálata igen hosszú múlttal rendelkező kutatási terület. Ujhelyi János doktori értekezésének irodalomjegyzékéből is kitűnik, hogy Feret „Sur la compacité des mortiers hydrauliques" c., mai napig is élő, elméleti szempontból különösen nagyértékű publikációja nem később, mint 1892-ben jelent meg, Abrams és Bolomey a nemzetközi betontechnológiai gyakorlatot jószerével még ma is uraló munkássága pedig lényegében az első világháborút követő évtizedben tetőzött. Az akkor már több mint félévszázados nemzetközi fejlődést átfogóan ismertető, értékelő és alkotóan továbbvivő magyar alapmű – Palotás László „Minőségi beton" c. könyve – 1952-ben jelent meg, vagyis idestova négy évtizede. Hogyan lehetséges, hogy 1990-ben elénk kerüljön és minden elismerést megérdemeljen egy olyan doktori disszertáció, amelynek fogalmi apparátusa szinte semmiben sem tér el a Feret, Abrams, Bolomey és Palotás nevével jelezhető fogalmi apparátustól, s ráadásul egyrészt csak áttételesen, másrészt lényegileg csak a régi fogalmi apparátus körében mozogva kapcsolódik a betonkutatás legmodernebb, mai élvonalához, amelyet a szerző maga értekezésének bevezetésében a beton struktúrájának és törési mechanizmusának integrált vizsgálatában lát, s amely – ismeretes módon – alapvetően él a technikai fejlődés olyan lehetőségeivel, mint az elektronmikroszkópia, a mikrorepedezés ultrahangos akusztikai nyomonkövetése, vagy a bonyolult rendszerek viselkedésének vizsgálatára univerzálisan használt számítógépes szimuláció ?

Az általam imént feltett kérdésre előbb átfogóan, az Ujhelyi János által végzett munka kiindulópontját, kérdésfeltevését, nehézségeit és eredményeit mintegy madártávlatból szemlélő módon törekszem válaszolni, majd rá kívánom terelni a figyelmet az értekezés néhány olyan konkrétumára, amelyek szerzőjének kutatói leleményességét és másfél évtizedet átfogóan szívós kísérletező erőfeszítéseinek tudományos eredményességét különösen szemléletes módon illusztrálhatják.

Lássuk előbb az átfogó értékelést.

1. A kiindulópont

Változatlan víz-cement tényező mellett a péptartalom növekedésének a nyomószilárdságot csökkentő hatását Ujhelyi János először 1973-ban észlelte, s ettől kezdve 1989-ig tervszerűen és kitartó makacssággal próbálta kideríteni ennek okait.

2. A kérdésfeltevés

A nyomószilárdságot meghatározó nagyszámú változó hatásainak elkülönítése érdekében a következő kérdésekre kellett választ keresnie:

- az adalékanyag geometriai jellemzői hogyan befolyásolják az adalékanyag tömörségét a víztartalom-tömörítési módszer kölcsönhatásában,
- az adalékanyag tömörsége kellő felvilágosítást ad-e arra a hézagtartalomra, amelyet cementpéppel kell, ill. lehet kitölteni,
- a tömörség kapcsolatba hozható-e az adalékanyag „cementpép-igényével”,
- található-e olyan vizsgálati módszer, amellyel külön az adalékanyag-víz, ill. a cement-víz keverékek bedolgozhatósága (konzisztenciája) ellenőrizhető, s ez reprodukálható eredményeket ad-e az adalékanyag-cement-víz keverékekre is,
- meghatározható-e szabatosan a szemcsés halmazok elkülönített szemcséinek, majd ezek keverékének a vízigénye bármely konzisztenciára,
- a bedolgozott friss beton pórustartalmát milyen tényezők határozzák meg és ez a pórustartalom milyen hatással van a beton mért nyomószilárdságára,
- lehet-e vizsgálni az adalékanyag-cement-víz keverékek szélsőséges összetételeit (a minimális cementtartalomtól a tiszta cementpépig bezárólag), a szélsőséges összetételekkel elérhető nyomószilárdságok becsülhetők-e a szakirodalomból ismert szilárdságbecslő képletekkel,
- lehet-e a különböző összefüggésekre matematikai kifejezéseket találni, amelyek a szélsőséges esetekre is illeszkednek.

3. A nehézségek

A betonok tulajdonságainak vizsgálatát az teszi hosszadalmassá, hogy

- a tulajdonságokat számos tényező befolyásolja, s ezeket a tényezőket nem lehet elkülönítve ellenőrizni (pl. a víz-cement tényező változtatható adott cement-adalékanyag arány mellett a víztartalom változtatásával, de ekkor változik a konzisztencia és a pép-tartalom; változatlan konzisztencia és cementtartalom mellett, de ekkor változtatni kell az adalékanyag szemeloszlását; változatlan konzisztencia és adalékanyag-minőség mellett, de ekkor változtatni kell a péptartalmat),
- a cement minősége törvényszerűen változik (ásványi összetétel, őrlésfinomság, kötőerő) szinte napról-napra, ezért két különböző időpontban gyártott, azonos helyről származó, azonos jelű cement jellemzői sohasem lehetnek változatlanok,
- a laboratóriumi vizsgálatok eredményeinek a szórása kikerülhetetlen, ezért csak megismételt vizsgálatokból lehet szabatos következtetéseket levonni.

Ezeknek az okoknak elkerülhetetlen következménye a betontechnológiai kísérletek hosszú időtartama, s ehhez kitartásra, türelemre van szükség.

A szakirodalom e területen szinte áttekinthetetlen s a különböző tényezők hatására ellentmondó magyarázatok találhatók (elég utalni a különböző szerzők vízigény-meghatározási módszereinek a különböző eredményeire). Az ellentmondásokat csak szisztematikus, a lehető legtöbb változó bevonásával végzett kísérletekkel lehet feltárni, ill. feloldani.

4. Az eredmények

Az értekezésben foglalt kísérletek legfontosabb eredményei a következők. A szerző:

- a vízigény becslésére hipotézist állított fel, ezt kísérletekkel bizonyította,
- vizsgálati módszert dolgozott ki a szélsőséges összetételek ellenőrzésére alkalmas víztartóképesség meghatározására,
- feltárta a tömörség és a pépigény összefüggéseit és eltéréseit,
- bizonyította a szakirodalomból ismert szilárdságbecslő képletek közös alapját, a matematikai formulák összefüggéseit és alkalmazhatósági határait,
- bizonyította a bedolgozott friss beton pórustartalmának hatását,
- a pórustartalom figyelembevételével a mért szilárdsági értékekből levezett a pórusmentes (elméleti) és csak a péphiány miatti pórust tartalmazó (gyakorlati optimális) betonok szilárdságát; ennek alapján bizonyította, hogy a szilárdságbecslő képleteket csak a gyakorlati optimumra lehet meghatározni,
- elkülönítette a péphiányos, a telített és túltelített betonkeverékeket a pépjellegű keverékektől és bizonyította, hogy a nyomószilárdság ebben a három tartományban csak eltérő módszerekkel becsülhető,
- megbízható matematikai összefüggéseket állított fel a betonösszetétel tervezésére, amely személyi számítógépen programozható.

Szemléletes konkrétumként a következőket szeretném kiemelni és méltatni:

1. <u>A betonvíztartalom meghatározásának logikai sémája és e séma matematikai kiaknázása.</u> Ujhelyi János felismerte, hogy a klasszikus (elsősorban Feret, Abrams, Bolopmey és Palotás nevével fémjelzett) betontechnológia különösen gyenge pontja a beton vízigényének a becslése, amit az értekezés 4. ábrája az olvasóban mondhatni megdöbbentő hatást keltve bemutat. Kiváltképpen szembetűnő a vízigény becslésére a különböző szerzők által javasolt módszerekkel nyert értékek eltérése a különösen kicsiny és a különösen nagy pépigényű szemeloszlás esetében. Ebből Ujhelyi azt a következtetést vonta le, hogy a rendteremtést ezeknek az extrémumoknak az esetéből kell elkezdeni, ill. ezeket az extrémumokat mintegy ad abszurdum vive a zéró adaléktartalmú és zéró cementtartalmú beton esetéből. Bizonyos plauzibilitásokra építve ez a következtetés vezetett az értekezés 5. és 6. ábrájának lépcsőin át az értekezés 14. ábrájáig (ezzel megegyezik a tézisek 1. ábrája), amely kifejlesztett formában bemutatja a szóbanforgó logikai sémát, s egyben a séma matematikai kiaknázásának alapjait is. A gondolatmenet az értekezés 15. ábrájával bemutatott további lépésen át vezetett az értekezés (39) és (40) jelű egyenletéhez, amelyeket a szerző kísérletileg is igazolt, s amelyek a klasszikus betontechnológiában nemzetközileg is gyökeresen új felfogás, s elméleti és gyakorlati szempontból egyaránt igen nagy jelentőségű eredményt jelentenek.

2. <u>Az adalék és a cement vízigényének meghatározására egyaránt alkalmas konzisztencia-mérési módszer feltalálása és bevezetése</u>. A klasszikus betontechnológia nagyjainak munkáiból természetesen kiviláglik, hogy a beton vízigényének meghatározását közülük többen is az adalék és a cement vízigényének valamilyen összegezése útján keresték. A baj csak az volt, hogy ezen az úton vagy tisztán elméleti (sokszor csupán ál-elméleti) lépések sorozatával próbáltak végigmenni, vagy olyan egyszer- s mindenkorra felvett kísérleti ál-

landók bevezetésével, amelyek relevanciáját, érvényességi tartományát messze túlbecsülték. Ezekre a tévutakra pedig az a puszta tény kényszeríttette őket, hogy nem állt rendelkezésre olyan vizsgálati módszer, amely az adalék, a cement és ezek **tetszőleges** keverékének vízigényét **egyaránt** képes lett volna mérni. Az előbbiekben méltatott vízigény-becslő logikai sémához hasonló – éppen egyszerűségében és magától értetődő plauzibilitásában zseniális – lépés volt Ujhelyi részéről, hogy a sok betontechnológus által a leginkább mértékadónak tartott VEBE-féle konzisztenciamérés alapelvére támaszkodva, de a szélsőséges esetekben a módszer használatát kizáró értékelhetőségi fogyatékosságot szellemesen kiküszöbölve, olyan nemzetközileg új konzisztenciavizsgálati módszert vezetett be, amely egészen új dimenziókat nyitott meg a betontechnológiai kísérletező munka előtt.

3. A logikai sémából következő új betonfelfogás és az új konzisztenciamérés által megnyitott új kísérleti lehetőségek termékenységét mutató döntő fontosságú új felismerések. Példaként célszerű itt a tézisek 4., 5. és 6. ábrájába koncentrált eredményekre utalni. A 4. ábra szemléletesen mutatja, hogy a túltelített, a telített és a telítetlen betonok szilárdságának becslése nem lehetséges a klasszikus betontechnológia által erőltetett egyetlen matematikai összefüggésre támaszkodva, hanem ez korrektül csak új módon, az egyes szakaszokra külön-külön végezhető. Az első (a tiszta cementpépek) tartományát jól ragadja meg a Powers-függvény, a második (a telített-túltelített betonok) tartományát az Abrams-féle hatványfüggvény (Abrams x-ének helyére $x^{0,5}$-ént helyettesítve, ami maga is nagyfontosságú felismerés), a harmadik (a telítetlen betonok) tartományára pedig Ujhelyi saját, új összefüggést javasolt.

   Az 5. ábra azt a megvilágító erejű új felismerést mutatja, hogy a bármilyen értékű vízcementtényező esetén is mindig akkor kapjuk a maximális nyomószilárdságot, amikor a hiánytalanul tömörített beton péptartalmának és a felhasznált adalékanyag pépigényének a különbsége 0, vagyis amikor a beton éppen telített. A 6. ábra ebbe a felismerésbe a konzisztenciát is beépítve azt mutatja, hogy változatlan konzisztencia mellett növekvő péptartalomhoz növekvő nyomószilárdság tartozik, éspedig hogyan. Ugyanez az összefüggés az adalékanyag újszerű értékeléséhez is ad támpontot.

4. A tézisek 18. oldalán található ún. „5. tervezési séma", amely a szerző által javasolt új betontervezési eljárás logikai folyamatábrája. Ezen a folyamatábrán koncentrált módon látható, hogy a szerző által javasolt betontervezési eljárás alkalmazása során az alapanyagok és a betonkeverék milyen jellemzőit kell figyelembe venni, s a végső tervezési döntés milyen alapvető paraméterek értékétől függően igazodik a számítással becsült és vizsgálattal mért telítettségi értékekhez. A módszertani pluralizmus konkretizálásában és a konkrét módszer megválasztásába döntő szerepet kap a szerző által már a kutatás kiindulásában eredeti módon bevezetett és alapul vett m_{c1} és m_{c2} érték, amelyek közül az első azt a maximális cementtartalmat jelenti, amelynél a beton vízigénye még nem tér el az adalék vízigényétől, a második pedig azt a minimális cementtartalmat, amelytől kezdve a beton vízigénye már csak a cementadagolás növelésével arányosan, vagyis az adalék vízigényétől bizonyos értelemben függetlenül változik. Ki hitte volna Ujhelyi kutatásai előtt, hogy m_{c1} és m_{c2} aránya 1 : 3 ?

   A szóbanforgó folyamatábra (s az általa reprezentált tervezési eljárás) egyébként iskolapéldája annak, hogy mi a matematika, a számszerű módszerek helyes spekulatív alkalmazása olyan bonyolult rendszerek esetében, amelyek totalitásukban nem írhatók le elfogadhatóan egyetlen, zárt matematikai összefüggéssel, vagy összefüggésrendszerrel. Ilyen esetekben a rendszer logikai elemzése és logikai modellezése az elsődleges út, amely korrektül elvégezve megmutatja, hogy a rendszeren belül milyen alesetekben van mód körülhatárolt érvényességű matematikai becslésekre, de még ezekben az esetekben is

milyen kísérleti kontrollok szükségesek a becslések verifikálására. Ez a módja a matematika bonyolult rendszerek esetében való alkalmazása körül újabban gyakran kialakuló meddő viták lezárásának, illetve ezek produktivitása helyreállításának.

Az értekezés érdemeinek eddigi méltatása után röviden kitérek még a végzett munka folytatásának kérdéseire, amelyeknek az ad bizonyos nyomatékot, hogy a folytatás több vonatkozásban is kívánatosnak tűnik. Természetesen bármilyen empirikus területen végbemenő kutatás sem merítheti ki teljesen a felmerülő problémákat, bármilyen körültekintően és bármilyen alapossággal végeztük is azokat, s a tudományos minősítés adott rendszerének követelményeit is kielégíteni kívánó értekezéseket ezen felül még terjedelmi korlátok is behatárolják. Ezért érdemben semmiképp nem kell negatív kicsengésűnek tekinteni, hogy szóvá teszünk olyan kérdéseket, amelyeket az értekezés nyitva hagy. Még kevésbé hatna a kérdések feltevése bírálatnak, ha értekezésének végén a szerző maga is foglalkozott volna a kutatás jövőbeli feladataival, amint ezt a publikáló kutatók sokszor megteszik.

Bizonyára inkább csak a terjedelmi korlátoknak tulajdonítható, hogy a betonstruktúra tervezésére vonatkozó ismertetés túlságosan tömör, összefoglaló jellegű, s az idevágó kísérleti adatokat az értekezés nem tartalmazza.

További hiányérzetet kelt, hogy az értekezésben ismertetett kísérletek legnagyobb része 350-es cementre alapozódott, s ezért a cementfajta hatásának a teljesség igényeit kielégítő értékelésére nem nyílhatott mód.

Szűkíti az értekezés megállapításainak érvényességi körét, hogy a szerző csak homokos kavics adalékanyagot vizsgált, zúzott követ nem.

A kémiai adalékszerek használatának rohamos fejlődését és terjedését átélve különös indíttatást érezhetünk az értekezésben publikált munka ezirányú folytatására, mert az értekezés a közölt eredmények szempontjából nem foglalkozott a kémiai adalékszerek hatásával.

A jövőbeli munkára váró kérdések átfogóbb körét és magasabb szintjét indukálhatjuk azzal, hogy az értekezést a klasszikusnak nevezhető betontechnológia igen jelentős horderejű és érvényességű lezárásaként értékeljük, lezárásként, mégpedig a klasszikusnak mondható betontechnológia sajátos, jellegzetesen klasszikus eszközeivel. Ezt a betontechnológiát – és eszközeit – az jellemezte, hogy a friss és a megszilárdult beton jellemzői közötti összefüggéseket a technológiai empíria szintjén vizsgálta, s elméletinek mondható erőfeszítése abban állt, hogy olyan matematikai összefüggéseket keresett, amelyekkel elég jól le lehetett fedni a technológiai empíria, a technológiai kísérletezés révén nyert adatokat. A jelenségek természettudományos interpretálására, megokolására a klasszikus betontechnológiában nem, vagy csak érintőlegesen került sor.

Mármost az utolsó 1-2 évtized vezető betontechnológiai kutatását – úgy látom – az jellemzi, hogy a jelenségek természettudományos interpretálásának az igénye már dominálóvá, uralkodóvá vált. Az uralkodó trend zászlójára a beton ***struktúrájának*** a nevét írta, s e szimbolikus gesztus azon a részben kimondott, részben kimondatlan meggyőződésen alapul, hogy a betonon tapasztalható jelenségek **megértése** a beton ***struktúrájára*** való visszavezetés révén lehetséges, és ez a betonon tapasztalható ***minden*** jelenségre érvényes. Így most azt élhetjük át, hogy a „klasszikus" betontechnológiát egy új, egy „strukturális" betontechnológia váltja le; a betontechnológiában most az történik, amit Thomas Kuhn a tudományon belüli paradigmaváltásnak nevezett.

Ujhelyi János ezt a paradigma-váltást – impresszióim szerint – igen jól látja, sőt: határozottan igenli, amit legelső lépésként azzal jelzett, hogy a „struktúra" szót, a „struktúra tervezése" kifejezést rögtön az értekezés címébe is beépítette. Ennek látszólag ellentmond, hogy értekezéséről az imént azt mondtam, hogy az a klasszikus betontechnológia jelentős horderejű lezárása a klasszikus betontechnológia eszközeivel. Nagyon érdekelne, hogy Ujhelyi János-

nak a szóbanforgó paradigmaváltásról mi a véleménye, és – elsősorban a saját területét illetően – miben látja a (sok tekintetben még csak embrionális korszakát élő) „strukturális betontechnológia” létrehozásának, kifejlesztésének legfontosabb jövőbeli feladatait?

Összefoglaló véleményként a következőket kell mondanom: amint ez részletes véleményem egészéből kitűnik, Ujhelyi János doktori értekezését tudományos szempontból nagy jelentőségű, kiváló munkának tartom, s ezért javasolom az értekezés nyilvános vitára bocsátását és részére a doktori fokozat odaítélését. Megjegyzem még, hogy véleményem szerint a doktori fokozat ENSZ-szakértőként Izlandban, Szíriában és Mongóliában végzett kiemelkedő tevékenységéért akkor is megilletné, ha nem adott volna be ilyen kiemelkedő értekezést.

Budapest, 1990. július 12.

Kunszt György s.k.
a műszaki tudományok doktora

Ujhelyi János

válaszai az opponensi véleményekben megfogalmazott észrevételekre

Mindenek előtt hálásan köszönöm Balázs György, Gyengő Tibor és Kunszt György, a műszaki tudományok doktorai elismerő szavait, és nemcsak mélyreható, az értekezésemben foglaltakra vonatkozó alapvető észrevételeit, hanem azokat az előremutató megállapításokat, javaslatokat is, amelyek a tárgyhoz kapcsolódó jövőbeli kutatási feladatokat tekintve adtak értékes útmutatásokat. Az opponensi véleményekben megfogalmazott kérdésekre, észrevételekre válaszaimat az alábbiakban foglalom össze.

Balázs György az alábbi kérdéseket tette fel, ill. észrevételeket fogalmazott meg:

1. A betonkeverék vízigényét milyen mértékben változtatja meg a homokdús adalékanyag, zúzott adalékanyag, vagy a nagyobb őrlésfinomságú cement felhasználása?

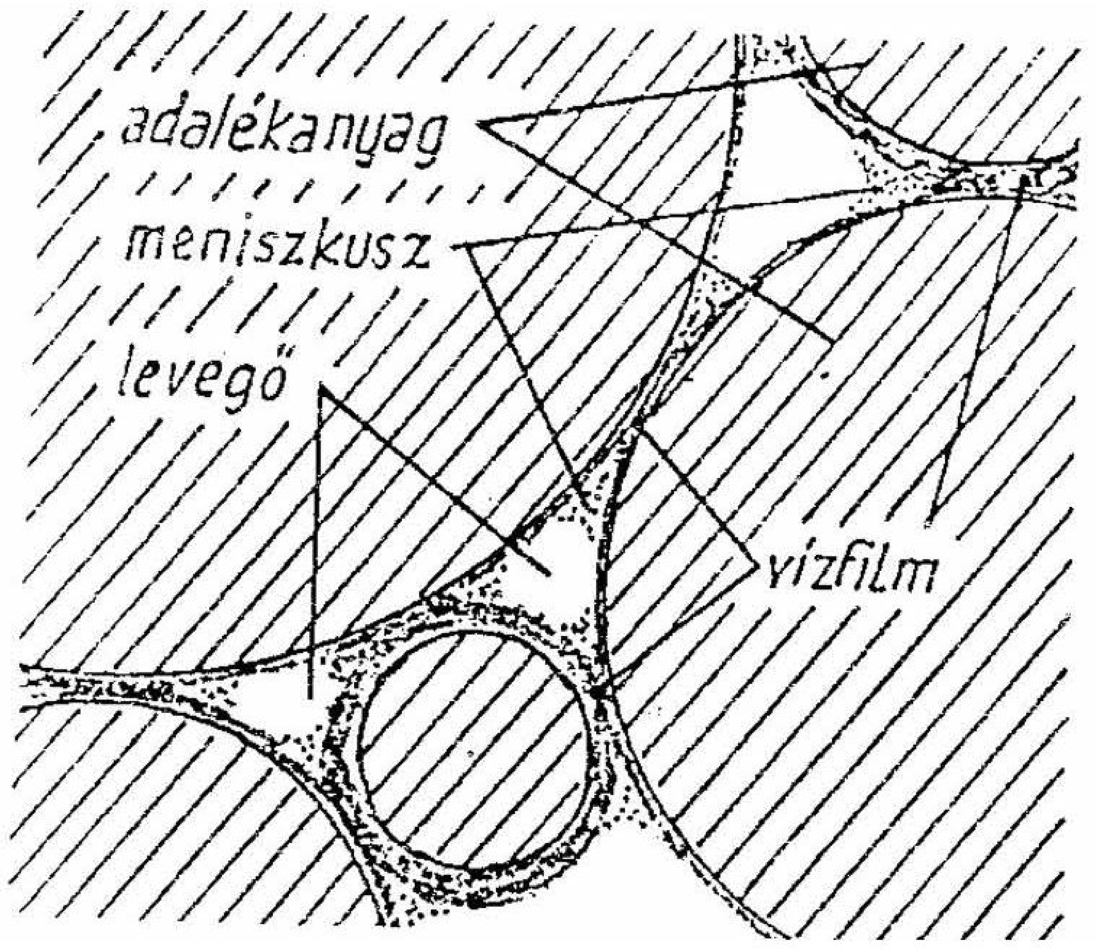
   Válasz: Adott konzisztenciájú (víztartó képességű) keverék vízigénye annál nagyobb, minél nagyobb egyrészt az adalékanyag, másrészt a cement vízigénye. A szemcsés anyagok vízigénye fajlagos (vízzel bevonandó) felületük függvénye. Ebből következik, hogy minél finomabb őrlésű a cement, illetve mennél több finomhomokot tartalmaz az adalékanyag, annál nagyobb a vízignye. Ennek számítását az 1. tervezési séma tartalmazza. Ha az adalékanyag fajlagos felülete nő, akkor vízigénye is nő. Ismeretes, hogy a zúzott adalékanyag kb. 5 %-kal igényel több vizet, mint az azonos szemmegoszlású homokoskavics. A víztartó képesség egyszerű vizsgálatával ennek pontos értéke munkahelyen is ellenőrizhető.

2. Szétválasztható-e a gyakorlatban a képlékeny, folyós és önthető konzisztencia, amelyek víztartóképességben kifejezett különbsége kicsiny, mindössze 0,1 – 3 s?

   Válasz: A gyakorlatban nem lehet szabatosan ellenőrizni azt, hogy a víztartó képesség 0,1; 1 vagy 3 sec, s ez a laboratóriumban is csak gondos munkával vizsgálható. De a többi konzisztencia vizsgáló módszer sem ad szabatos munkahelyi eredményt, minthogy az üzemi betonkeverés nem lehet szórásmentes. Nem véletlen, hogy pl. a képlékeny konzisztencia roskadási mérőszámára a szabvány 41-100 mm határértékeket enged meg.

3. Az adalékanyagok hézagtérfogatát kitöltő péptartalom elméleti, amelynél a gyakorlati pépigény nagyobb. Mi erről a véleményem?

Válasz: A vizsgálataim során nem száraz adalékanyag-halmazok hézagtérfogatát vizsgáltam, hanem az adott víztartóképességnek megfelelő mennyiségű vízzel megkevert halmaz tömörségét a víztartó-képességnek megfelelő vibrálás eredményeként. Ebből következik, hogy ilyen vizsgálat eredményeként a halmaz szemcséi a mellékelt ábra szerinti módon adott vastagságú vízfilmmel voltak bevonva (minél kisebb a szemcse, annál nagyobb a felületi feszültség, annál vastagabb a vízfilm), és a levegőtartalom nem a száraz halmaz hézagtérfogatával volt egyenlő, hanem a szemcsék+vízfilm által elfoglalt tér és a teljes befoglaló tér különbségével. Ezt az adott módon vibrált vizes halmazban maradó levegőt kell cementtel kitölteni, hogy „telített” (cementtel, ill. cementpéppel telített) betonhoz jussunk. Ennek megfelelően az általam „cementpéppel telített”-nek nevezett beton az Építőanyag Tanszék által „gyakorlatilag péptelített”-nek nevezett betonnal azonos.



A szilárdságbecslő függvények empirikus függvények. Vizsgálta-e jelölt a betonok tényleges tömörségét? Hogyan tudta elérni, hogy ne távozzon el a keverékből víz a próbatestkészítés során? Mi a hatása a tényleges betontömörségnek s az módosítja-e a szilárdságbecslő összefüggéseket?

Válasz: A tényleges tömörséget nemcsak friss, bedolgozott betonpróbatestek tömegének a mérésével, hanem az 1 napos korban kizsaluzott betonpróbatestek térfogatának a víz alatti mérésével is ellenőriztem. A próbatestek csatlakozásait tömítettem és a víztartóképességnek megfelelő ideig vibráltam, ennek eredményeképpen nem volt vízeltávozás. A szilárdságbecsló képletek állandóit a friss, bedolgozott állapotban levegőmentes telített-túltelített betontestek eredményeiből számítottam, míg a telítetlen betontestekben csak a péphiány miatti levegőtartalom maradhatott. Amennyiben a gyakorlatban nem érik el a teljes tömörséget, akkor a várható nyomószilárdságot a 4. tervezési sémában megadott módon számítottam ki. Ezzel kapcsolatban azt is meg kell jegyeznem, hogy a szakirodalomban sokszor lehet találni olyan szilárdságvizsgálati eredményeket, ahol nem a tömör betonra átszámított értékeket közlik, hanem a mért értékeket. Ezek a mért értékek azonban hibásak, ha a betonnpróbatest nem volt megfelelően tömörítve, és csak akkor használhatók fel az összefüggések meghatározására, ha a tömörítési hiba okozta szilárdság-eltérést figyelembe véve a korrekt kísérletekkel elérhető szilárdságot kiszámítják.

A kis víz-cement tényezőjű cementpépek vizsgálatakor a diszlokáció elkerülésére hidegtárolást alkalmazott, ez azonban szabványos vizsgálatok esetén nem alkalmazható. Mit értett diszlokáció alatt? Az Építőanyag Tanszék kísérletei szerint a kis víz-cement tényezőjű betonok idősebb kori szilárdságcsökkenésének nem a hidratációhő növekedése az oka, hanem a gátolt hidratáció. Mi erről jelölt véleménye?

Válasz: A hidratációhő okozta struktúra- és szilárdságváltozást csak a cementpépek vizsgálatakor tapasztaltam s ennek szilárdságcsökkenést okozó eredményét mutattam be a 41. ábrán. Ha a cementpépek víz-cement tényezője <0,28 volt, akkor az azokból készített próbatestek hőmérséklete néhány óra múlva jelentősen megnőtt és a gondos utókezelés ellenére a testek repedezni kezdtek, 28 napos szilárdságuk pedig az ábrának megfelelően csökkent. Ha a próbatesteket ~ +5 ^{o}C-on készítettük és az első 7 napon át így tároltuk, akkor a repedezés és a szilárdságcsökkenés megszűnt.

Jobbnak tartaná opponens az értekezésnek „A beton nyomószilárdságának struktúra szemléletű tervezése” címet adni. Hiányzik az érvényességi tartomány megadása (természetes homokos kavics, természetes betonszilárdulás, 350 cement). Lát-e jelölt lehetőséget, hogy

a betonösszetétel tervezésből az empirikus elemeket valamikor ki lehet-e küszöbölni? Mennyire bonyolítja a betonösszetételek meghatározást Jelölt módszere az MI-04.19-81-hez képest? Alkalmas-e a struktúra szemléletű betontervezés meghatározott húzószilárdságú, vízzáróságú, kopásállóságú, fagy- és sózásállóságú beton összetételének megállapítására?

Válasz: Értekezésemben – vizsgálataim alapján – nemcsak a nyomószilárdság, hanem a struktúra tervezésére is javaslatokat adtam, mindkét esetre logikai megfontolások alapján megfogalmazott hipotézisek kísérleti bizonyítása révén. Vizsgálataimhoz homokos kavicsot és főleg 350-es, kisebb mennyiségben 450-es cementet használtam fel, a próbatestek normális hőmérsékleten szilárdultak. A tervezési állandók ezekre az alapanyagokra vonatkoznak. Bármilyen más alapanyag felhasználásakor alkalmazhatók azonban az értekezésemben ismertetett vizsgálati módszerek a vízigény és a pépigény megállapítására, ebből következően a megadott tervezési állandók érvényességi tartománya homokos kavicsra, 350 és 450 cementre, normális szilárdulásra vonatkozik, de a vizsgálati módszerek általános érvényűek (könnyű adalékanyag, zúzottkő, bármilyen cementfajta, változó érlelelési módok).

Minthogy a betonnal szemben támasztott követelmények, valamint a betonszerkezetek készítésekor alkalmazott módszerek száma szélsőségesen sok lehet, ezért úgy vélem, hogy az empirikus elemek jelentős része, amelyeket laboratóriumi vizsgálatok révén lehet csak számszerűsíteni, megmarad, de a laboratóriumi vizsgálatok jelentős mértékben egyszerűsödnek azáltal, hogy az adott feltételekhez (nyomószilárdság, húzószilárdság, fagy- és sózásállóság stb.) tartozó legjobb struktúrát megtervezve nagymértékben korlátozható a változók száma.

Az értekezésemben bemutatott betonösszetétel-tervezési módszer vitathatatlanul bonyolultabb, mint a táblázatokban megadott cement-, víz- és adalékanyag-tartalom felvétele (pl. MI-04.19), de lényegesen pontosabb, és a képleteimre támaszkodó számítógépen a tervezés semmilyen problémát nem okoz. Erre vonatkozó programokat már többen is kidolgoztak.

Opponens indokolást ad, hogy miért nem fogadja el a 7., a 11. és a 12. tézist (a többit elfogadja).

Válasz: Az észrevételt a 7. tézisre elfogadom, minthogy a tézis nem általános érvényű, csak a gazdaságosság egyik tényezőjére vonatkozik.

A 11. tézis az előírt betonminőség elérésének véleményem szerint nagyon fontos elemére, nevezetesen a betonszilárdság várható szórásának meghatározására vonatkozik, ill. a legfeljebb ± 2 MPa szélső értékű szilárdság elérésének feltételeit fogalmazza meg, kimutatva, hogy e tekintetben legfontosabb feltétel az egyenletes minőségű, legfeljebb ± 0,35 finomsági-modulus eltérésű adalékanyag felhasználása. Ezért ezt változatlanul tézisnek tekintem.

A 12. tézis tartalmazza a struktúrának a péptelítettségre alapozott tervezését, amely nemzetközileg is új, a vizsgálataim által igazolt eredmény és megállapítás (lásd még **Kunszt György 2.** véleményére adott választ).

Gyengő Tibor kérdései, ill. észrevételei a következők:

Kérdés: a pépigényre vonatkozó eredmények véglegesek-e?

Válasz: Homokos kavics adalékanyagra véglegesnek tekintem, más adalékanyagokra is (pl. zúzottkő) a kidolgozott vizsgálati eljárásokat felhasználva végleges adatokhoz lehet jutni.

A tervezési eljárás a gyakorlati szakember számára bonyolultnak tűnik.

Az első érdemi fejezet (3) a betonkeverék vízszükségletét tárgyalja. A vízigény becsléséhez, meghatározásához elkerülhetetlen a betonkeverék konzisztencia mérése is. Jelölt az ismert, többféle konzisztenciát mérő módszerekkel dolgozott és megállapította, hogy az azokkal elért eredmények – bár azonosaknak kellett volna lenniök – egymástól eltérők voltak. Ez abból következett, hogy minden konzisztencia vizsgáló módszer a friss betonkeverék másmás anyagjellemzőjét méri. Jelölt kutatási tevékenységének érdeméül hozható fel, hogy kutatásai során eredményesen alkalmazott egy, általa kidolgozott, újfajta konzisztencia vizsgálati módszert, amely a keverék víztartóképességén alapszik a vizsgálat közben, tömörítés alatt. A módszer a betonkeverék bedolgozhatóságának megállapítására elég megbízható.

Jelölt a fejezet végén a különféle vízigény meghatározó módok értékelése alapján a betonkeverék vízadagolására matematikai képleteket ad.

A következő fejezet (4) az adalékanyag tömörsége és pépigénye közötti összefüggéssel foglalkozik. A betonkeverék lehető legnagyobb mértékű tömöríthetősége nagyon fontos tényező, aminek alapvető kiindulási feltétele a szemcsés halmazok tömörsége. Ezzel a kutatók már a múlt század vége óta foglalkoztak, mert azok térfogatától függ az optimális betonkeverékhez szükséges cementpép-igény.

A kutatók által végzett vizsgálatok eltérő eredményei vitték rá Jelöltet, hogy vizsgálja az eltérések okait és abból következtetve egy megbízhatóbb becslési eljárást dolgozzon ki. Vizsgálatai sok szempontra rámutattak, amelyek között már ismertek is voltak. Javaslatokat is dolgozott ki. Felteszem a kérdést, hogy a pépigényre vonatkozó eredményeit véglegesnek tekinti-e?

Nagyon fontos fejezete az értekezésnek a beton nyomószilárdságának a becslésére vonatkozó (5). Nagyon jó gyakorlati érzékkel elemzi és bírálja a szilárdságra kiható technológiai módokat és lehetőségeket alátámasztva saját kísérletekkel. Megállapította, hogy a víz--cement tényező befolyása a nyomószilárdságra csak más paraméterekkel kölcsönhatásban vizsgálható, amely következtetésre mások is – ha nem is ennyire határozottan – már rájöttek.

De máshol is mond kijelentés jellegű állításokat, amelyek már ismertek. Ezeket én fogalmazás jellegű hibának tekintem.

Az említett fejezetek után (6) a cementkötésű keverékek teljes vizsgálatának a tárgyalására. Ebben a fejezetben felhasználja a korábbi három fejezetben tárgyalt tényezőkre megállapítottakat. Azok felhasználásával a beton nyomószilárdságának a becslésére, ill. tervezett szilárdságú betonok összetételének tervezésére a gyakorlatban megbízhatóan alkalmazható összefüggéseket dolgoz ki.

A következő (7) fejezet az eddigi kísérleti és szakirodalmi adatok felhasználásával kidolgozott összefüggések és kísérleti eredmények alapján a Jelölt által kidolgozott tervezési módszerrel és algoritmussal foglalkozik az előirányzott szilárdságú beton összetételének megtervezésére. Ez tulajdonképpen a korábbi fejezetekben kidolgozott részeredmények összefoglalása. Az összefoglalást a gyakorlati alkalmazás sorrendjében logikusan végzi; annak felhasználása a gyakorlati szakemberek számára mégis bonyolultnak tűnik annak ellenére, hogy azt közismert gyakorlati tanácsokkal és javaslatokkal igyekszik érthetőbbé tenni és a számítással kapott eredmények várható pontosságára, szórására utalni.

A 7. fejezettel azonos jellegű az eredményeket és a módszereket összefoglaló, utolsó érdemi fejezet (8), amely a betonstruktúra tervezésére, a péptelítettség fogalmára alapozva, kidolgozott javaslatát foglalja össze az alkalmazás gyakorlati feltételeinek megemlítésével.

Az értekezés a formai követelményeknek megfelel. Terjedelme 129 gépelt oldal és 81 sorszámozott ábrát, valamint egy rövid, 10 oldalas táblázatos függeléket tartalmaz. Hiányolható, hogy az ábráknak nincs címfeliratuk.

A betonstruktúrában különböző méretrendeket lehet megkülönböztetni. Ezeket megbízható (pontos és hibátlan) vizsgálatok alkalmával olyan szinteken kell értelmezni, amelyek az egyes kémiai fázisoktól a mérnöki összetevőkig terjednek. Ennek megfelelően a következő szinteket kell vizsgálni:

- makroszint, amelynek méretrendje *mm* és *m* között van. Ebbe tartoznak az alkotóanyagok kg/m^3-ben vagy liter/m^3-ben kifejezett összetételi arányai, tehát a cement-, az adalékanyag-, a kiegészítő anyag- és a víztartalom, a levegőtartalom, és az adalékszer tartalom, valamint a készítés durva hibái;
- mezoszint, amelynek méretrendje a mikrométer és a mm között van. Ebbe tartoznak a cement és a homok szemcséi, a szilárd beton kapilláris porozitása, és a légbuborék képző adalékszerekkel képzett mesterséges légbuborékok, a cementkőváz és az adalékanyag szemek határfelülete, a mikrorepedések stb.;
- mikroszint, amelynek méretrendje az Angström és a mikrométer között van. Ebbe tartoznak a cementkő fázisösszetételei, a rácshibák, a gél belső fajlagos felülete, felületi területe, a diszlokációk, a gélpórusok, a károsító anyagok ionjai stb.

Ezek a szintek egymással kölcsönhatásban állnak, mert pl. a cementkő mikroszintű fázisösszetétel befolyásolja mezoszinten a cementkő-adalékanyag határfelületi jellemzőit, vagy a makroszintű durva hibák befolyásolják a károsító anyagok mikroszintű ionjainak a mozgását a betonban.

A tönkremenetel ritkán tulajdonítható egyetlen oknak: gyakran lehet a beton megfelelő néhány kedvezőtlen jellemzője ellenére, de az ehhez hozzáadódó egyetlen újabb kedvezőtlen tényező már előidézhet károsodást. Ezért kell – többek között – a struktúra jellemzőinek a kölcsönhatásait is bevonni a vizsgálatokba.

Remélem, hogy az előadottak megvilágítják véleményemet a betonstruktúra tervezésének halaszthatatlan szükségességéről, egyúttal érthetővé teszik, hogy értekezésem a struktúra makroszintű jellemzőinek a tervezését tárgyalja, amely valóban nem általános, de nagyon lényeges struktúra-szint.

Végezetül ismételten hálás köszönetemet fejezem ki opponenseimnek értekezésem mélyreható bírálatáért.

Budapest, 1990. július 20. Ujhelyi János s.k.

A Magyar Tudományos Akadémia 7 tagú bírálóbizottsága, SZABÓ JÁNOSNAK, az MTA rendes tagjának vezetésével – a vita és a hozzászólások eredményeképpen – a benyújtott értekezést egyhangúlag elfogadta, az elérhető maximális (21) pontszámmal.